

ლეილა ჩიჩუა, რუსუდან ქანთარია

ფიზიკა

საყრდენი კონსპექტი

დამხმარე სახელმძღვანელო
საატესტატო და ეროვნული გამოცდებისათვის



გამომცემლობა „კლიო“

ლეილა ჩიჩუა, რუსუდან ქანთარია

ფიზიკა

დამხმარე სახელმძღვანელო საატესტატო და ეროვნული გამოცდებისათვის

რედაქტორი **ლეილა ჩიჩუა**

კომპიუტერული უზრუნველყოფა
ელენე ვარამაშვილი

მეორე გამოცემა

© გამომცემლობა „კლიო“ 2015

© ლ. ჩიჩუა, რ. ქანთარია, 2015

ყველა უფლება დაცულია

ISBN 978-9941-441-48-6



გამომცემლობა „კლიო“

ალმაშენებლის გამზირი 181,
თბილისი, 0112, საქართველო

ტელ.: (+995 32) 234 04 30

E-mail: book@klio.ge

www.klio.ge

წინასიტყვაობა

სახელმძღვანელოში ფიზიკის სასკოლო კურსი წარმოდგენილია საყრდენი კონსპექტების და თეორიული მასალის მოკლე კონსპექტის სახით, რომელიც ეყრდნობა საქართველოს განათლების სამინისტროს მიერ დამტკიცებულ საშუალო სკოლის საატესტატო და ეროვნულ საგამოცდო პროგრამებს.

საყრდენი კონსპექტი – ეს განსაკუთრებული ფორმაა იდეების ვიზუალური ფორმით – სქემებით, ნახატებით, ძირითადი ცნებებით გადმოცემისათვის, ანუ ესაა სასწავლო მასალის კონსპექტირება ლოგიკურ-მხატვრული გზით. იგი მოიცავს თითქმის ყველა საჭირო ინფორმაციას.

ეროვნული სასწავლო გეგმის მიხედვით მოსწავლემ უნდა შეძლოს საკუთარი ცოდნის დამოუკიდებლად კონსტრუირება სხვადასხვა პრობლემის გადასაჭრელად, რომლისთვისაც ამ სახელმძღვანელოში მოცემული საყრდენი კონსპექტები დაეხმარება მას.

სახელმძღვანელო, ჩვენ მიერ შედგენილი ფიზიკის ტესტების კრებულთან (ლეილა ჩიჩუა, რუსუდან ქანთარია – „ფიზიკა. ტესტები, ცნობარი – VII-XII კლასელთათვის, აბიტურენტებისა და აბიტურიენტებისათვის“) ერთად, დაეხმარება, როგორც საჯარო სკოლის მოსწავლეებს საატესტატო გამოცდისათვის მომზადებაში, ასევე იმ აბიტურიენტებს, რომლებიც ფიზიკას აბარებენ ეროვნულ გამოცდებზე. ამასთან ერთად, წიგნში მოცემული საყრდენი და თეორიული მასალის კონსპექტები მასწავლებლებს შეუძლიათ გამოიყენონ ფიზიკის შემაჯამებელი გაკვეთლების წარმართვისათვის.

ვფიქრობთ, სახელმძღვანელო დაეხმარება მოსწავლეებს მოკლე დროში ეფექტურად გაიხსენონ წინა წლებში ნასწავლი ფიზიკის თეორიული მასალა და მოემზადონ გამოცდებისთვის.

გისურვებთ წარმატებებს!

ლეილა ჩიჩუა leilach42@mail.ru

რუსუდან ქანთარია rusikokantaria@gmail.com

შ ი ნ ა ა რ ს ი

ფიზიკა, როგორც საბუნებისმეტყველო მეცნიერება	7
საყრდენი კონსპექტი (სქემები)	8
კინემატიკის საფუძვლები.....	34
1. მექანიკური მოძრაობა.....	34
2. მოქმედებები ვექტორებსა და მათ გეგმილებზე.....	35
3. ტრაექტორია. გავლილი მანძილი. გადაადგილება	37
4. წრფივი თანაბარი მოძრაობა	37
5. სიჩქარეთა შეკრების წესი.....	38
6. წრფივი არათანაბარი მოძრაობა.....	40
7. გადაადგილება თანაბარაჩქარებული მოძრაობისას.....	41
8. თანაბარი მოძრაობა წრენირზე.....	42
9. ცენტრისკენული აჩქარება	43
ურთიერთქმედება მძაწანიკაში.....	44
10. ინერცია. ნიუტონის I კანონი	44
11. მასა.....	44
12. ძალა	45
13. ნიუტონის II კანონი	45
14. ნიუტონის III კანონი	46
15. სიმძიმის ძალა. სიმძიმის ცენტრი	46
16. სხეულთა წონასწორობის სახეები	47
17. ბერკეტი	48
18. ჭოჭონაქი.....	49
19. მოძრაობა დახრილ სიბრტყეზე.....	50
ქალაზი მძაწანიკაში.....	52
20. მსოფლიო მიზიდულობის ძალა.....	52
21. სხეულთა თავისუფალი ვარდნის აჩქარება	52
22. დრეკადობის ძალა.....	53
23. სხეულის წონა.....	54
24. ხახუნის ძალა	55
ჰიდროსტატიკა და აეროსტატიკა	56
25. ნივთიერების სიმკვრივე.....	56
26. წწევა.....	56
27. სითხის წწევა ჭურჭლის ფსკერსა და კედლებზე	57
28. პასკალის კანონი	57
29. ზიარჭურჭელი	58
30. ჰიდრავლიკური მანქანა	58
31. ატმოსფერული წწევა.....	59
32. არქიმედეს კანონი.....	59
33. სხეულთა ცურვის პირობები	60

მუდმივობის კანონები მექანიკაში	61
34. სხეულის იმპულსი.....	61
35. იმპულსის მუდმივობის კანონი	61
36. მექანიკური მუშაობა და სიმძლავრე	62
37. მექანიკური ენერგია	64
38. ენერგიის მუდმივობის კანონი.....	65
 მექანიკური რხევები და ტალღები.....	66
39. ჰარმონიული რხევა.....	66
40. მათემატიკური ქანქარა. ზამბარიანი ქანქარა	67
41. ენერგიის გარდაქმნა რხევითი მოძრაობის დროს	67
42. იძულებითი რხევა. რეზონანსი.....	68
43. მექანიკური ტალღები.....	68
44. განივი და გრძივი ტალღები.....	69
45. ბგერითი ტალღა	69
 გეომეტრიული ოპტიკა	71
46. სინათლის გავრცელება ერთგვაროვან გარემოში.....	71
47. სინათლის არეკვლა.....	72
48. გამოსახულების აგება ბრტყელ სარკეში.....	72
49. სინათლის გარდატეხა. გარდატეხის მაჩვენებელი.....	73
50. სინათლის დისპერსია	74
51. ლინზები.....	75
52. გამოსახულების აგება ლინზაში.....	75
53. თხელი ლინზის ფორმულა	76
54. თვალი, როგორც ოპტიკური სისტემა	77
 სითბური მოვლენები.....	78
55. ნივთიერების აგებულება	78
56. ბროუნის მოძრაობა	79
57. დიფუზია.....	79
58. მოლეკულების ურთიერთქმედება	79
59. აირადი, თხევადი და მყარი აგრეგატული მდგომარეობები.....	80
60. ტემპერატურა. აბსოლუტური ტემპერატურა.....	80
61. იდეალური აირი.....	82
62. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება	82
63. იდეალური აირის კანონები.....	83
64. შინაგანი ენერგია და მისი შეცვლის ხერხები.....	86
65. სითბოს რაოდენობა.....	87
66. საწვავის წვის კუთრი სითბო	87
67. მუშაობა თერმოდინამიკაში.....	88

68. თერმოდინამიკის I კანონი.....	89
69. თერმოდინამიკის I კანონის გამოყენება იზოპროცესებში.....	89
70. სითბური ბალანსი	90
71. დნობა და გამყარება	91
72. აორთქლება და კონდენსაცია.....	92
ელექტროსტატიკა	94
73. ელექტრული მუხტის შენახვის კანონი	94
74. კულონის კანონი	95
75. ელექტრული ველის დაძაბულობა	96
76. ელექტრული ველის ძალწირები.....	97
77. დიელექტრიკული შეღწევადობა	98
78. ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა.....	98
79. ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი.....	99
80. პოტენციალთა სხვაობა.....	100
81. ელექტროტევადობა. ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა.....	100
82. კონდენსატორის ენერგია	101
ელექტრული დენი	103
83. დენის ძალა.....	103
84. დენის წყაროები.....	103
85. დენის მოქმედებები.....	104
86. ძაბვა.....	104
87. გამტარის წინაღობა. კუთრი წინაღობა.....	105
88. ომის კანონი წრედის უბნისათვის	106
89. გამტარების მიმდევრობითი შეერთება.....	106
90. გამტართა პარალელური შეერთება	107
91. დენის მუშაობა და სიმძლავრე	107
92. ჯოულ-ლენცის კანონი.....	108
93. დენის წყაროს ელექტრომამოძრავებელი ძალა.....	109
94. ომის კანონი სრული წრედისათვის.....	109
95. ელექტრული დენი მეტალებში და სითხეებში	110
96. ელექტრული დენი აირებში.....	111
97. ელექტრული დენი ნახევარგამტარებში	112
98. ცვლადი დენი	112
99. დენის ძალისა და ძაბვის ეფექტური მნიშვნელობა	113
100. ტრანსფორმატორი	114
გამოყენებული ლიტერატურა	115

ფიზიკა, როგორც საბუნებისმეტყველო მეცნიერება

ფიზიკა ერთ-ერთი საბუნებისმეტყველო მეცნიერებაა. იგი შეისწავლის ფიზიკურ მოვლენებს. **მოვლენებს, როდესაც არ ხდება ნივთიერების გარდაქმნა, ფიზიკური მოვლენები ეწოდება.** ფიზიკურ მოვლენებს მიეკუთვნება: მექანიკური, სითბური, ელექტრო-მაგნიტური, ოპტიკური მოვლენები და მოვლენები, რომლებიც ატომსა და ატომის ბირთვში მიმდინარეობს.

ფიზიკა ექსპერიმენტული მეცნიერებაა და მისი კვლევის მეთოდებია: **დაკვირვება და ცდა (ექსპერიმენტი).** დაკვირვებას ახდენენ ჩვეულებრივ, ბუნებრივ პირობებში. ცდის ჩატარება კი წინასწარ მომზადებას გულისხმობს.

ჩვენ გარშემო არსებულ ყველა საგანს **ფიზიკური სხეული** ან უბრალოდ, სხეული ეწოდება. ფიზიკური სხეული არის ობიექტი, რომელსაც აქვს მასა, საკუთარი ფორმა, შესაბამისი მოცულობა და სხვა სხეულებისაგან გამყოფი საზღვარი. ფიზიკური სხეულებია, მაგ.: მაგიდა, სახლი, მანქანა, ვარსკვლავები, პლანეტები და ა.შ. ფიზიკური სხეულები ხასიათდებიან სხვადასხვა თვისებებით: სიმკვრივით, ელექტროგამტარობით, ტემპერატურით და სხვა **ფიზიკური თვისებებით.**

ყველა სხეული შედგება ნივთიერებისაგან. მაგალითად: ოქრო, ვერცხლი და ტყვია – ნივთიერებებია. ნივთიერება შედგება მოლეკულებისაგან, მოლეკულა კი ატომებისაგან. ატომი რთული აღნაგობისაა. მის ცენტრში მოთავსებულია მასიური ბირთვი, რომელიც შედგება პროტონებისა და ნეიტრონებისაგან. ბირთვის გარშემო არიან ელექტრონები. მოლეკულებისა და ატომების ზომები იმდენად მცირეა, რომ მათი დანახვა ძლიერი მიკროსკოპითაც კი შეუძლებელია. ასევე მოლეკულებს შორის არსებული მანძილები ძალიან მცირეა, ამიტომ ადამიანს ნივთიერება ერთიანი და მთლიანი ეჩვენება.

სხეულები და ფიზიკური მოვლენები რაოდენობრივად ხასიათდება **ფიზიკური სიდიდეებით.** ფიზიკური სიდიდე არის სხეულისა და ფიზიკური მოვლენის ისეთი მახასიათებელი, რომლის გაზომვა შესაძლებელია. ცდის ჩატარებისას უმრავლეს შემთხვევაში ზომავენ ფიზიკურ სიდიდეს. მაგ., ფიზიკური სიდიდეებია: მანძილი, მასა, დრო, ტემპერატურა, მოცულობა და სხვ.

ფიზიკურ სიდიდეებს აქვს **რიცხვითი მნიშვნელობა და საზომი ერთეული.** ისეთ ფიზიკურ სიდიდეს, რომელსაც აქვს მხოლოდ რიცხვითი მნიშვნელობა და არა აქვს საზომი ერთეული, **განყენებული სიდიდე** ჰქვია. მაგ.: ფარდობითი დიელექტრიკული შეღწევადობა, ხახუნის კოეფიციენტი განყენებული სიდიდეებია.

ფიზიკური სიდიდის გასაზომად ეს ფიზიკური სიდიდე უნდა შევადაროთ ამ სიდიდის ერთეულად მიღებულ ეტალონურ სიდიდეს. მაგ.: სიგრძის ეტალონია მეტრი, მასის ეტალონია კილოგრამი...

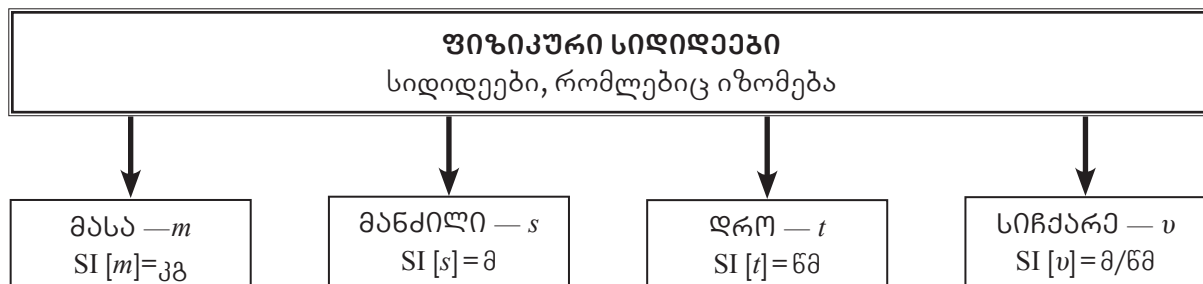
ყველა ფიზიკური სიდიდის უშუალო გაზომვა შეუძლებელია, ამიტომ ზოგიერთი ფიზიკური სიდიდის ერთეულები მიიღება იმ ფორმულების გამოყენებით, რომლებიც ერთმანეთთან აკავშირებს გაზომილ ფიზიკურ სიდიდეებს.

ფიზიკური სიდიდეების ერთეულის დასადგენად შემოღებულია სხვადასხვა ერთეულთა სისტემები.

SI სისტემის (S – სისტემა, I – ინტერნაციონალური) ძირითადი ერთეულები

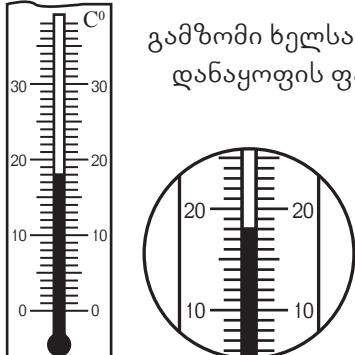
ფიზიკური სიდიდე	აღნიშვნა	ერთეული
სიგრძე	l, s	1 მეტრი (1 მ)
მასა	m, M	1 კილოგრამი (1 კგ)
დროის შუალედი	t, τ	1 წამი (1 წმ)
დენის ძალა	I	1 ამპერი (1 ა)

ფიზიკური სიდიდე	აღნიშვნა	ერთეული
აბსოლუტური ტემპერატურა	T	1 კელვინი
ნივთიერების რაოდენობა	ν	1 მოლი
სინათლის ძალა	I	1 სანთელი (1 სნ)



ზოგიერთი გაზომვი ხელსაწყო	
სახაზავი სპიდომეტრი მენზურა სასწორი	წამმზომი თერმომეტრი ამპერმეტრი ვოლტმეტრი

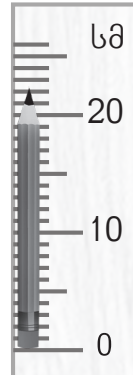
გაზომვი ხელსაწყო დანაყოფის ფასი



გაზომვი ხელსაწყო დანაყოფის ფასი = $\frac{\text{სკალის ორ უახლოეს რიცხვით სიდიდეთა სხვაობა}}{\text{დანაყოფების რიცხვი მათ შორის}}$

თერმომეტრის დანაყოფის ფასი = $\frac{20^{\circ}\text{C} - 10^{\circ}\text{C}}{10} = 1^{\circ}\text{C}$

გაზომვის ცდომილება

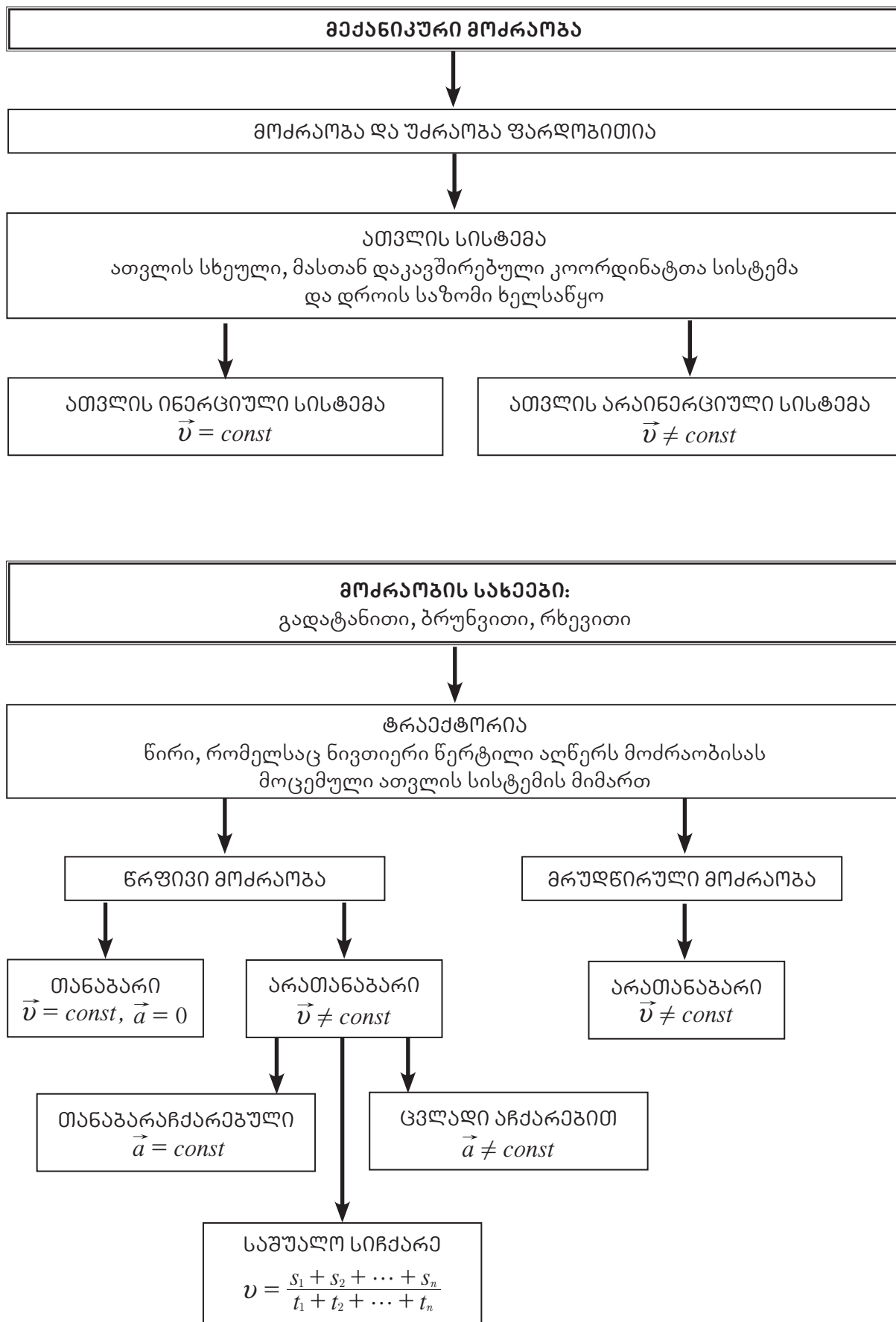


გაზომვის ცდომილება = $\frac{\text{ხელსაწყო სკალაზე უმცირესი დანაყოფის ფასის } 0,5}{\text{სახაზავის დანაყოფის ფასი}} = 0,5 \text{ სმ}$

სახაზავის დანაყოფის ფასი = 1 სმ

გაზომვის ცდომილება = 0,5 სმ

ფანქრის სიგრძე $l = 22 \pm 0,5 \text{ სმ}$



წრფივი თანაბარი მოძრაობა

სხეულის დროის ნებისმიერ ტოლ შუალედებში ერთნაირ გადაადგილებებს ასრულებს

გავლილი მანძილი

$$s = vt$$

გადაადგილება

$$\vec{s} = \vec{v}t$$

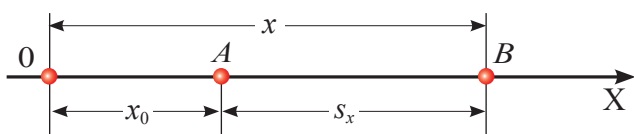
სიჩქარე

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} = const$$

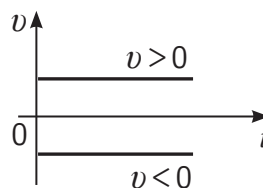
წრფივი თანაბარი მოძრაობის განტოლება

$$x = x_0 + s_x$$

$$s_x = v_x t$$



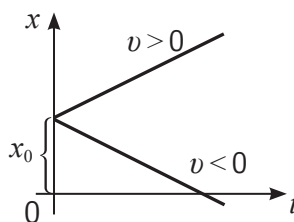
სიჩქარის მოდულის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი



სხეულის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი

$$x = x_0 + v_x t$$

$$x = x_0 - v_x t$$



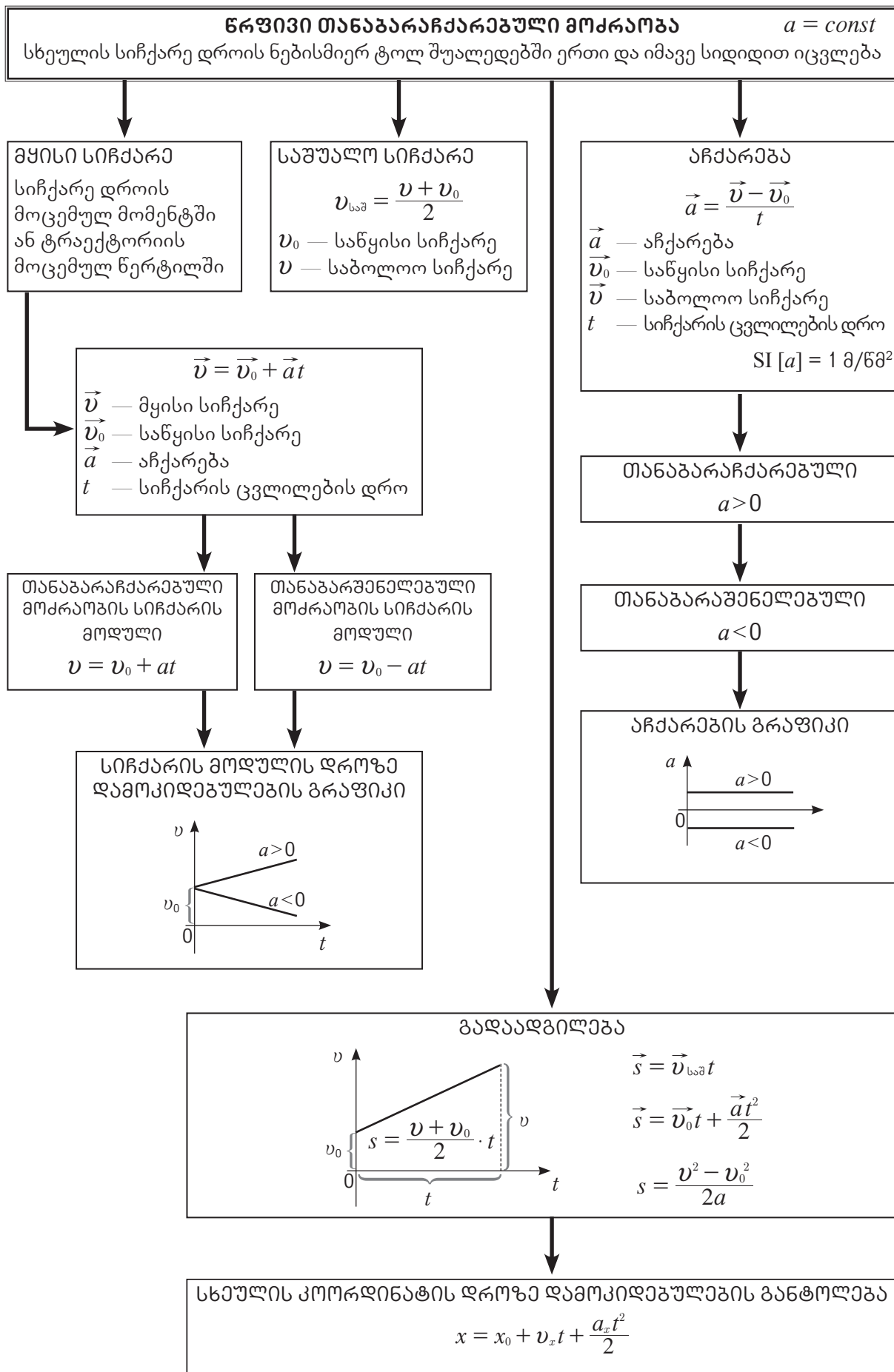
სიჩქარეთა შეკრების წესი

$$\vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2$$

$\vec{v}$ — სხეულის სიჩქარე ათვლის უძრავი სისტემის მიმართ

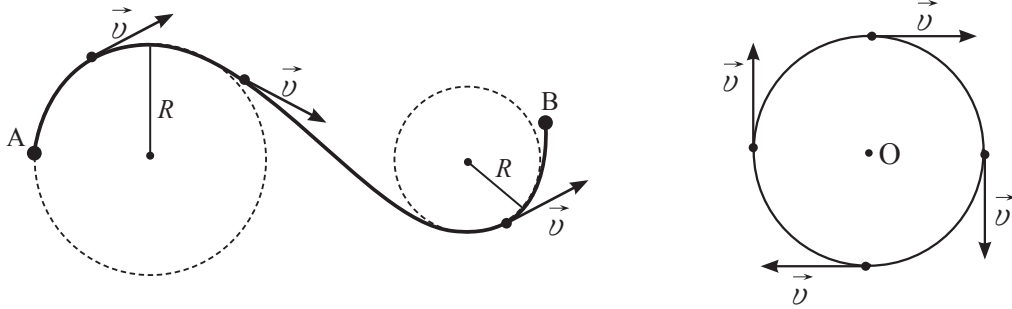
$\vec{v}_1$ — სხეულის სიჩქარე მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ

$\vec{v}_2$ — მოძრავი ათვლის სისტემის სიჩქარე უძრავის მიმართ



მრუდწირული მოძრაობა

სიჩქარე



$\vec{v}$ — სიჩქარე ყოველ წერტილში მიმართულია ამ წერტილზე გავლებული მხეხის გასწვრივ.

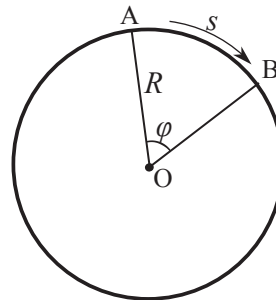
წირითი სიჩქარე

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}, \quad v = \frac{2\pi R}{T} = 2\pi R\nu$$

კავშირი წირით და კუთხურ
სიჩქარეს შორის

$$v = \omega R$$

კუთხური სიჩქარე SI $[\omega] = 1$ რად/წმ



$$\omega = \frac{\phi}{t}$$

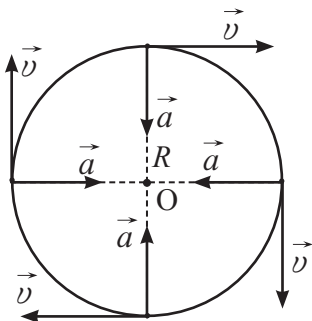
ω — კუთხური სიჩქარე
 ϕ — რადიუსის შემობრუნების კუთხე
 t — შემობრუნების დრო

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

თანაბარი მოძრაობა წრეწირზე

$$v = \text{const}$$

$\vec{v}$ — ვექტორის მიმართულება
იცვლება



პერიოდი — ერთი სრული
ბრუნვის დრო

$$T = \frac{t}{N}$$

$$\text{SI } [T] = 1 \text{ წმ}$$

სიხშირე

$$\nu = \frac{N}{t}$$

N — t დროში ბრუნვათა რიცხვი

$$\text{SI } [\nu] = 1 \text{ ჰერცი} = 1 \text{ წმ}^{-1}$$

ცენტრისკენული აჩქარება
მიმართულია წრეწირის ცენტრისკენ

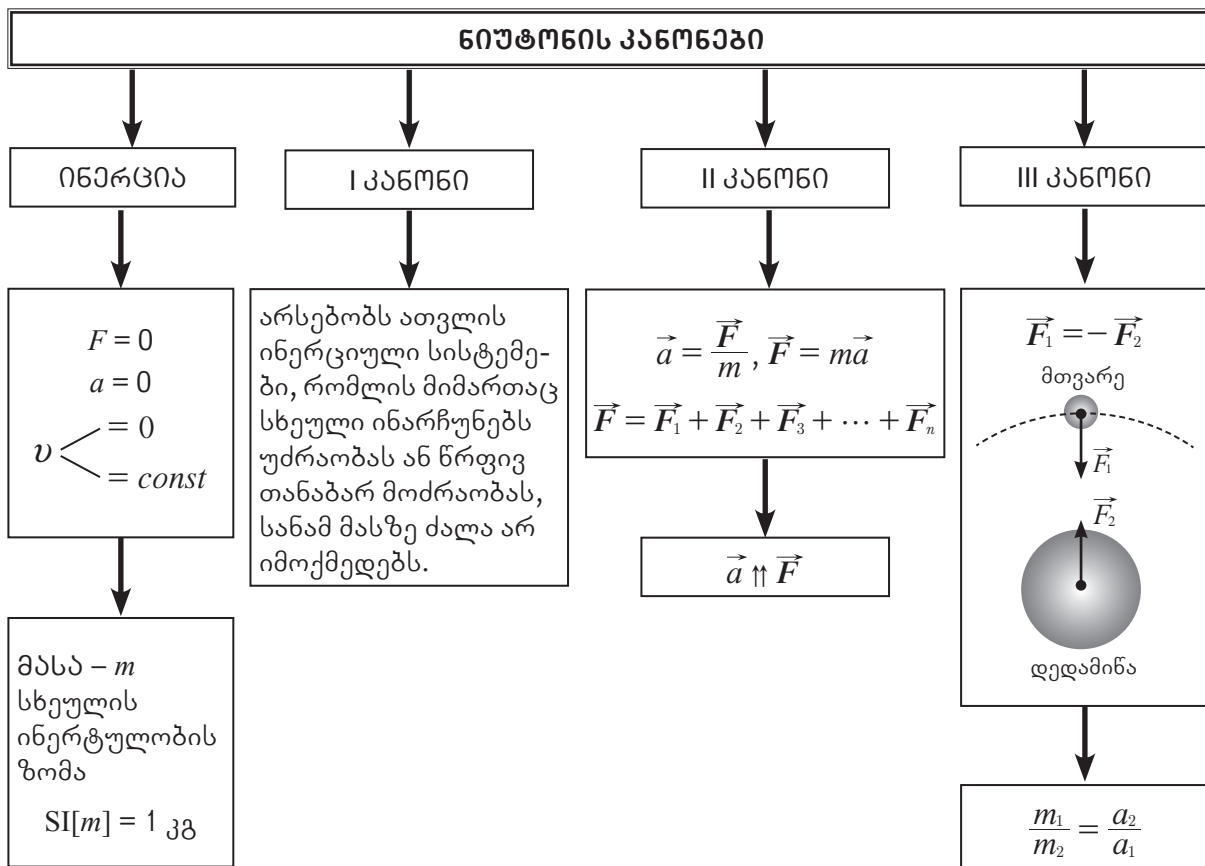
$$a = \frac{v^2}{R}$$

$$a = \omega^2 R = 4\pi^2 \nu^2 R = \frac{4\pi^2}{T^2} R$$

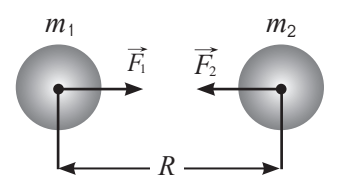
$$a = v\omega$$

კავშირი პერიოდსა და
სიხშირეს შორის

$$T = \frac{1}{\nu} \quad \nu = \frac{1}{T}$$



მსოფლიო მიზიდულობის კანონი
(ი. ნიუტონი — 1667)



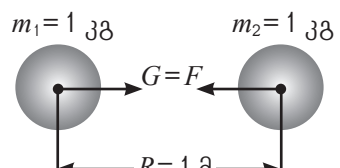
$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2}$

F — მსოფლიო მიზიდულობის ძალა

G -ს ფიზიკური აზრი

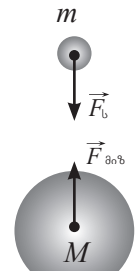
$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2, F_1 = F_2 = F$

$G = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{6\delta^2}{\text{კგ}^2}$



$m_1 = 1 \text{ კგ}, m_2 = 1 \text{ კგ}$
 $R = 1 \text{ მ}$

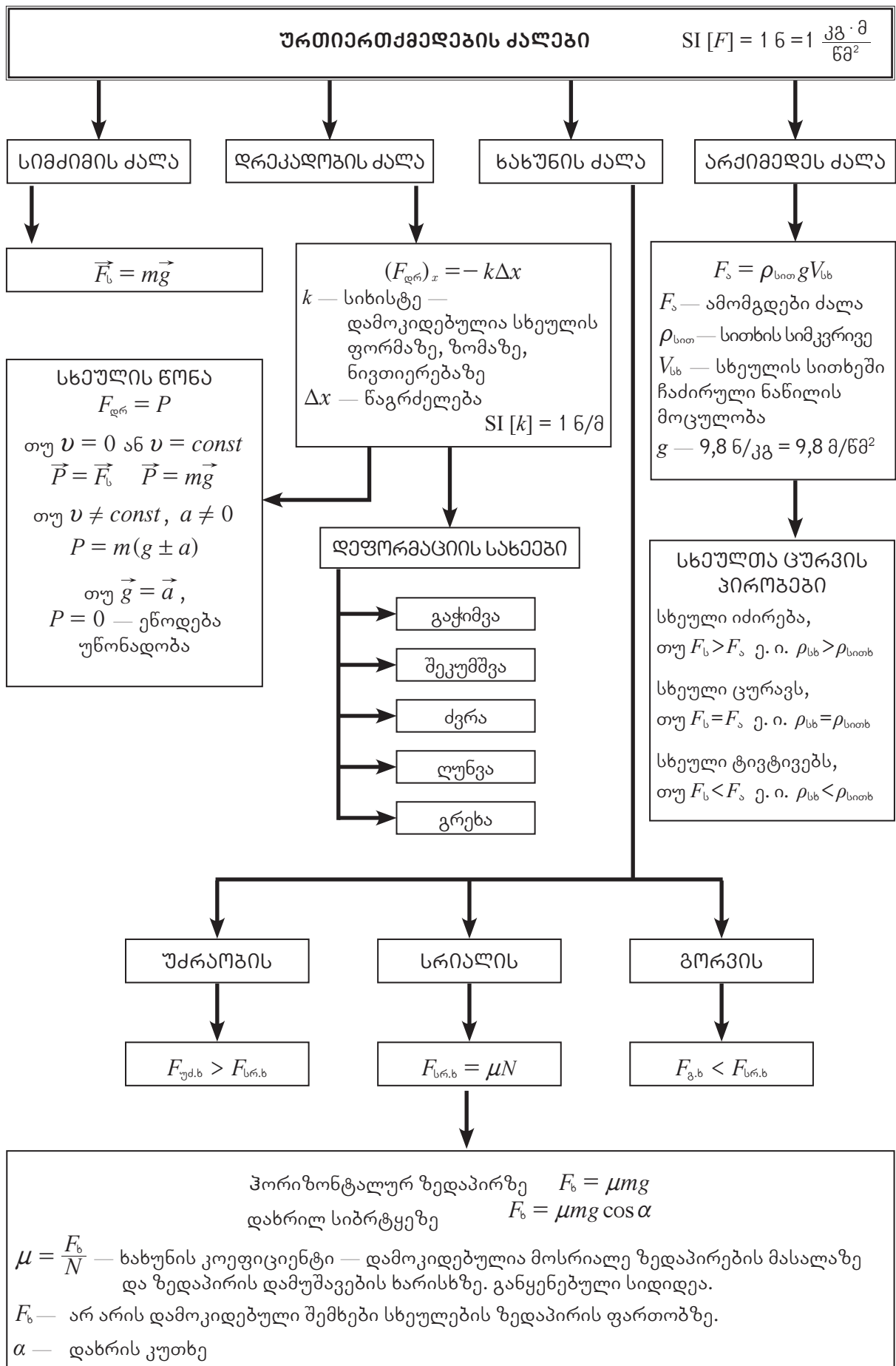
თავისუფალი პარადნის აჩქარება



$F_{\text{სიძდ}} = F_{\text{მიზ}}, \quad mg = G \frac{Mm}{R^2}, \quad g = G \frac{M}{R^2}$
 $g_h = G \frac{M}{(R_{\text{ღ}} + h)^2}$

$g_{\text{პოლუსზე}} = 9,83 \text{ მ/წმ}^2,$

$g_{\text{ეკვატორზე}} = 9,78 \text{ მ/წმ}^2$



წნევა

SI $[p] = 1 \text{ ნ/მ}^2 = 1 \text{ პა (პასკალი)}$

$$p = \frac{F_{\text{წნ.დ}}}{S}$$

p — წნევა

$F_{\text{წნ.დ}} = pS$ — წნევის ძალა

S — საყრდენი ზედაპირის ფართობი

$$F_{\text{წნ.დ}} \perp S$$

სითხის წნევა

$$p = \rho gh$$

ρ — სითხის სიმკვრივე

g — $9,8 \text{ ნ/კგ} = 9,8 \text{ მ/წმ}^2$

h — სითხის სვეტის სიმაღლე

პასკალის კანონი

სითხეზე და აირზე მოქმედი წნევა უცვლელად გადაეცემა
სითხისა და აირის ყოველ წერტილს

ზიაჭურჭელი

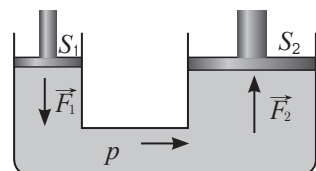


$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$$

თუ $\rho_1 = \rho_2$, მაშინ $h_1 = h_2$

თუ $\rho_1 \neq \rho_2$, მაშინ $\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}$

ჰიდრავლიკური მანქანა



$$\frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}$$

მარტივი მექანიზმები

ბერკეტი

I გვარის

$$M = \pm F \cdot d$$

M — ძალის მომენტი
 F — ძალა
 d — ძალის მხარი

წონასწორობის პირობა
 $M_1 + M_2 = 0 \Rightarrow F_1 d_1 = F_2 d_2$

II გვარის

წონასწორობის პირობა
 $F_1 d_1 = F_2 d_2$

III გვარის

წონასწორობის პირობა
 $F_1 d_1 = F_2 d_2$

ჭოჭონაძი

უძრავი ჭოჭონაძი

წონასწორობის პირობა
 $F_1 r = F_2 r$
 $F_1 = F_2$

დახრილი სიბრტყე

მოძრავი ჭოჭონაძი

წონასწორობის პირობა
 $F_1 r = F_2 2r$
 $F_2 = \frac{F_1}{2}$

ძალაში მოგება

$$\frac{F}{mg} = \frac{h}{l}$$

$$F = \frac{mgh}{l}$$

$$\frac{h}{l} < 1 \quad F < mg$$

მარტივი მექანიზმების კოეფიციენტი

$$\eta = \frac{A_{\text{სას}}}{A_{\text{სრ}}} \cdot 100\% = \frac{mgh}{Fl} \cdot 100\%$$

სხეულის იმპულსი

$$\text{SI } [p] = 1 \text{ კგ } \frac{\text{მ}}{\text{წმ}}$$

$$\vec{p} = m\vec{v}$$
$$\Delta\vec{p} = \vec{F}\Delta t$$

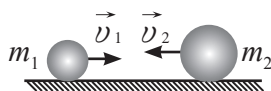
$\vec{p}$ — სხეულის იმპულსი

$\vec{F}\Delta t$ — ძალის იმპულსი

Δp — სხეულის იმპულსის ცვლილება

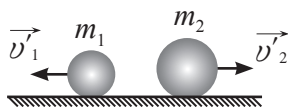
ჩაკეტილი სისტემის იმპულსი

ურთიერთქმედებამდე



$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = \vec{p}_{\text{სისტ}}$$

ურთიერთქმედების შემდეგ



$$m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2 = \vec{p}_{\text{სისტ}}$$

იმპულსის მუდმივობის კანონი

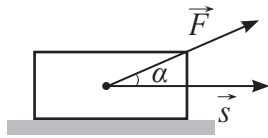
$$m_1\vec{v}_1 + m_2\vec{v}_2 = m_1\vec{v}'_1 + m_2\vec{v}'_2$$

$$\vec{p}_{\text{სისტ}} = \text{const}$$

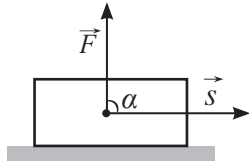
მექანიკური მუშაობა

SI [A] = 1 ჯ (ჯოული)

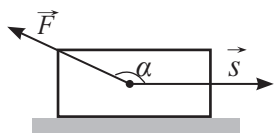
$$A = F S \cos \alpha$$



თუ $\cos \alpha > 0$, მაშინ $A > 0$



თუ $\cos \alpha = 0$, მაშინ $A = 0$



თუ $\cos \alpha < 0$, მაშინ $A < 0$

სიმძიმის ძალის მუშაობა
 $A = mgh$

დრეკადობის ძალის მუშაობა
 $A = \frac{kx^2}{2}$

სიმძლავრე

SI [N] = 1 ჯ/წმ = 1 ვტ (ვატი)

$$N = \frac{A}{t}$$

$$N = F \frac{s}{t} \cos \alpha = Fv \cos \alpha$$

$$\vec{F} = \text{const}$$

ენერგია

ახასიათებს სხეულის მიერ მუშაობის შესრულების უნარს

მექანიკური

სითბური

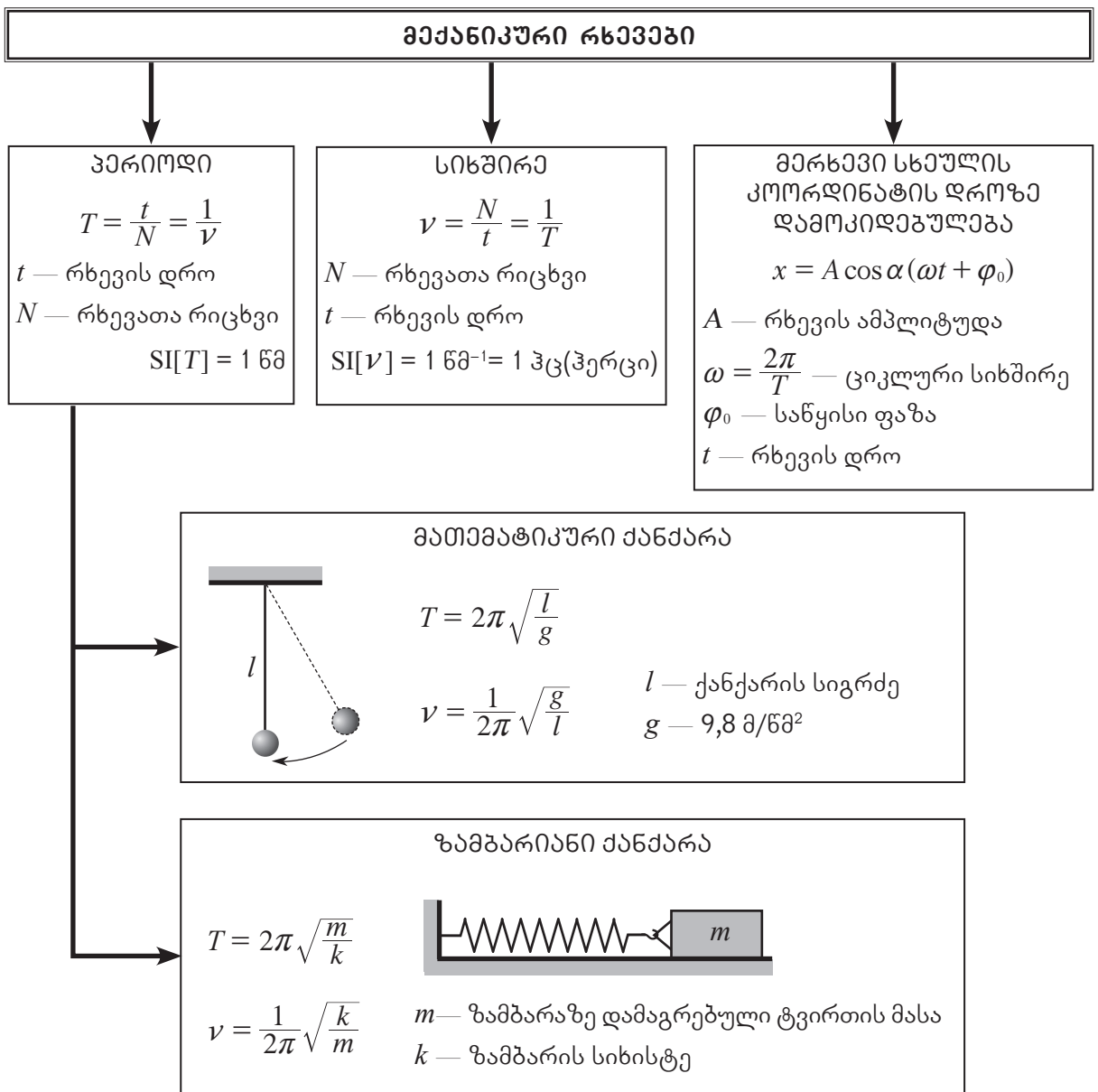
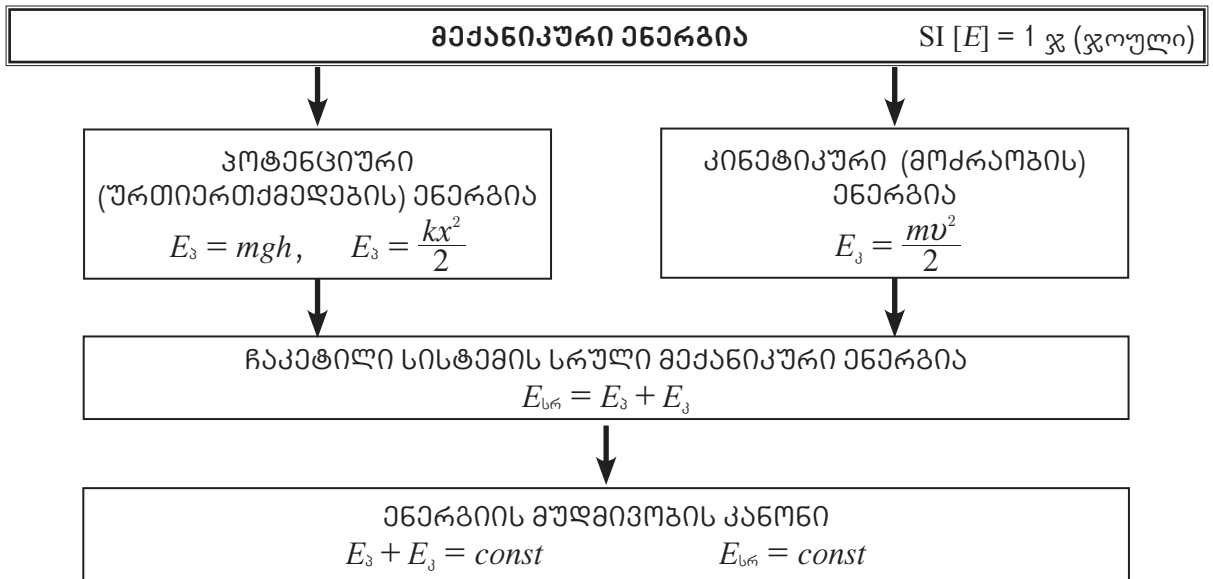
ელექტრული

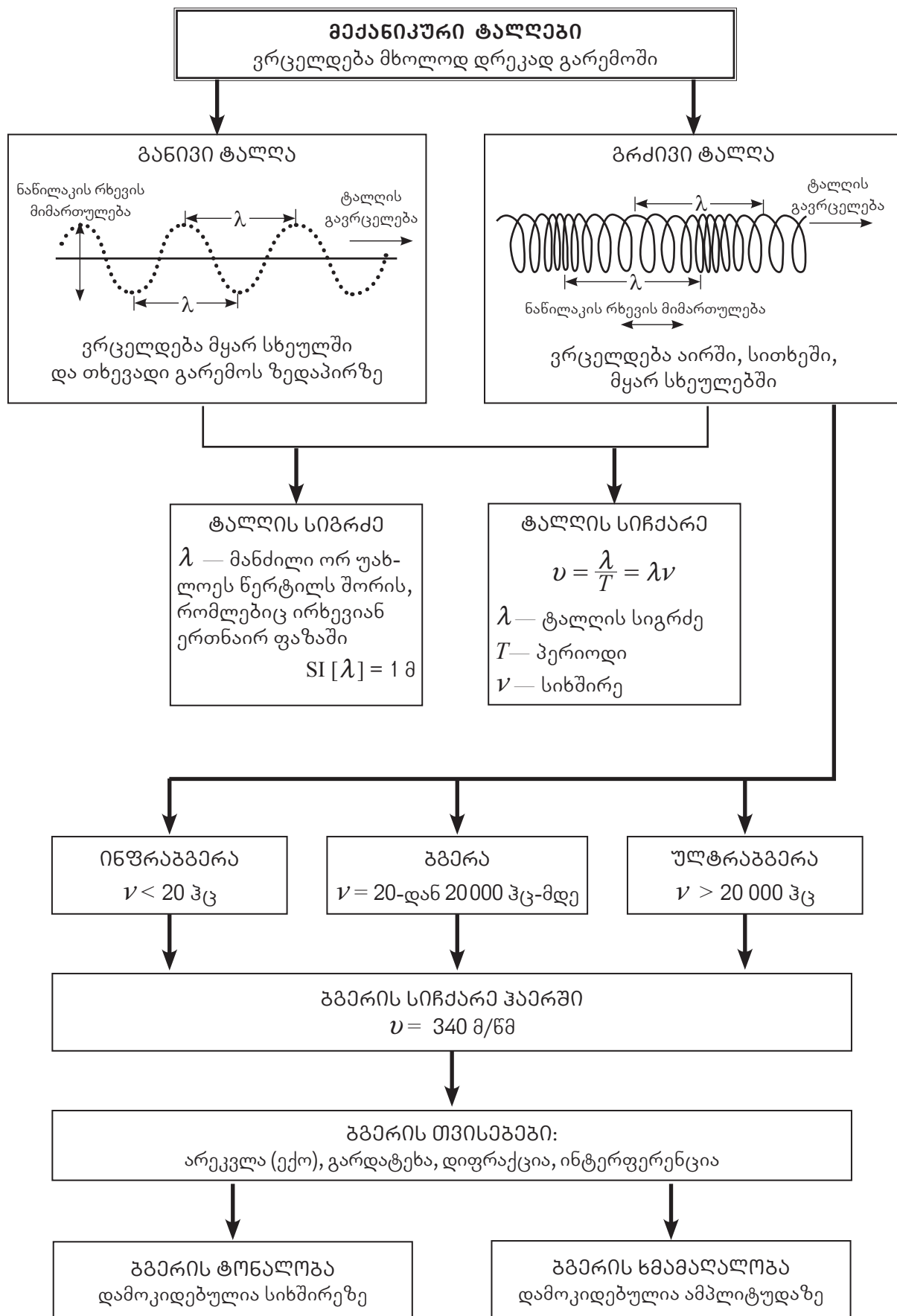
შინაგანი

სინათლის

ატომური

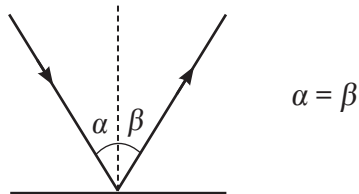
ენერგიის ერთეული
SI [E] = 1 ჯ (ჯოული)





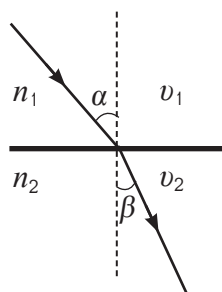
გეომეტრიული ოპტიკა

სინათლის არეკვლა



α — დაცემის კუთხე
 β — არეკვლის კუთხე

სინათლის გარდატეხა



$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21}$$

α — დაცემის კუთხე

β — გარდატეხის კუთხე

$n_1 = \frac{c}{v_1}$ — პირველი გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი

$n_2 = \frac{c}{v_2}$ — მეორე გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი

v_1 — სინათლის სიჩქარე პირველ გარემოში

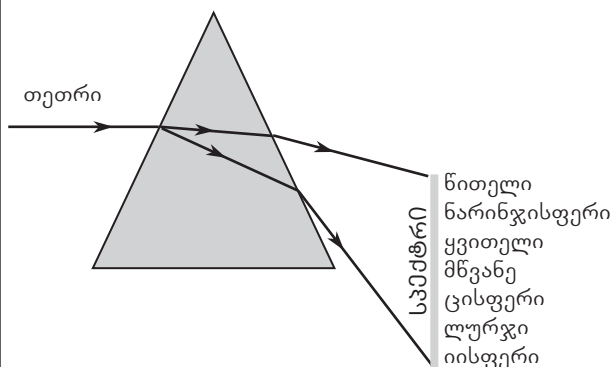
v_2 — სინათლის სიჩქარე მეორე გარემოში

n_{21} — მეორე გარემოს გარდატეხის ფარდობითი მაჩვენებელი პირველი გარემოს მიმართ

c — სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში

სინათლის დისპერსია

გარდატეხის მაჩვენებლის
დამოკიდებულება სინათლის ფერზე

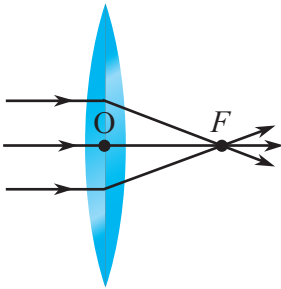


$$n_{\text{იისფ}} > n_{\text{წით}}$$

$$v_{\text{იისფ}} < v_{\text{წით}}$$

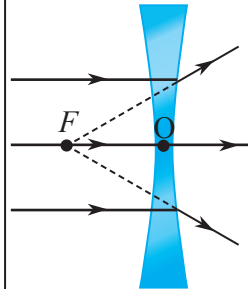
ლინზა

ამონაქილი ლინზა შემკრები



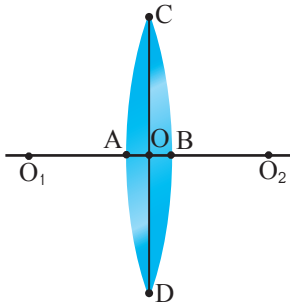
OF — ფოკუსური მანძილი
 F — ლინზის მთავარი ფოკუსი
 $F > 0$ (ნამდვილი)

ჩაზნაქილი ლინზა გამგნევი

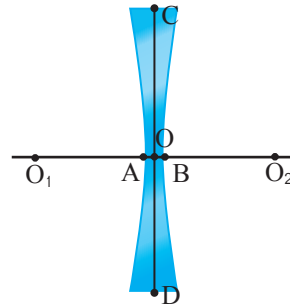


OF — ფოკუსური მანძილი
 F — ლინზის მთავარი ფოკუსი
 $F < 0$ (წარმოსახვითი)

თხელი შემკრები ლინზა $AB \ll CD$



თხელი გამგნევი ლინზა $AB \ll CD$



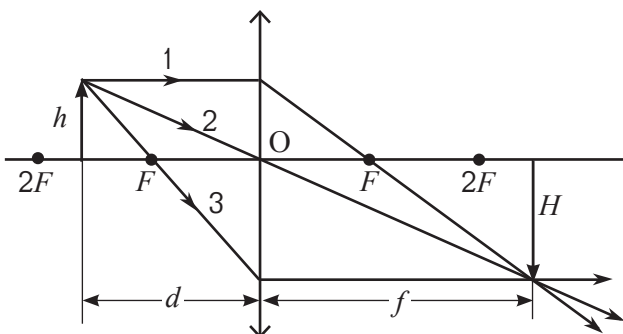
O — ლინზის ოპტიკური ცენტრი; O_1O_2 — მთავარი ოპტიკური ღერძი

ლინზის ოპტიკური ძალა

$$D = \pm \frac{1}{F} \quad SI[D] = 1 \text{ დპტრ (დიოპტრი)}$$

1 დპტრ — ლინზის ოპტიკური ძალაა, თუ $F = 1\text{მ}$
 შემკრები ლინზის $D > 0$; გამგნევი ლინზის $D < 0$

გამოსახულების აგება შემკრებ ლინზაში



თხელი შემკრები ლინზის ფორმულა

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}$$

თხელი გამგნევი ლინზის ფორმულა

$$-\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f}$$

ლინზის გამადიდებლობა (Γ)

$$\Gamma = \frac{H}{h} = \left| \frac{f}{d} \right|$$

ნივთიერების აგებულება

ნივთიერების რაოდენობა

$$\nu = \frac{N}{N_A} = \frac{m}{M} \quad \text{SI} [\nu] = 1 \text{ მოლი}$$

ν — ნივთიერების რაოდენობა

N — მოცემულ სხეულში მოლეკულების (ატომების) რიცხვი

$N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ მოლი}^{-1}$ — ავოგადროს რიცხვი —
1 მოლში მოლეკულების (ატომების) რიცხვი

m — სხეულის მასა

$M = m_0 N_A$ — ნივთიერების მოლური მასა

m_0 — ნივთიერების ერთი მოლეკულის მასა

ნაწილაკების ქაოსური მოძრაობა

დიფუზია

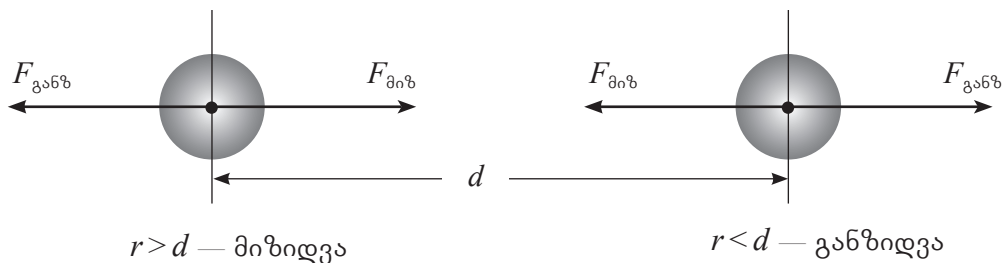
ნივთიერების ნაწილაკების
თავისთავადი შეღწევა

ბროუნის მოძრაობა

სითხეში შეტივტივებული
ნაწილაკების მოძრაობა

ნაწილაკების ურთიერთქმედება

ნივთიერების ნაწილაკები მიიზიდებიან ან განიზიდებიან



d — ატომებს შორის მანძილი წონასწორობისას

r — ატომებს შორის მანძილი წონასწორობის დარღვევისას

აირის მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი განტოლება

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}$$

p — აირის წნევა

$n = \frac{N}{V}$ — მოლეკულების კონცენტრაცია

V — აირის მოცულობა, N — ნაწილაკების რიცხვი V მოცულობაში

$\bar{E} = \frac{m_0 \bar{v}^2}{2}$ — მოლეკულის საშუალო კინეტიკური ენერგია

m_0 — მოლეკულის მასა

$\bar{v}^2$ — სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა

აბსოლუტური ტემპერატურა

$$T = t + 273$$

t — ტემპერატურა ცელსიუსის სკალით

$$\Delta t(K) = \Delta t(^{\circ}C)$$

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება

მენდელეევი-კლავირონის განტოლება

$$pV = \frac{m}{M} RT$$

p — აირის წნევა

V — აირის მოცულობა

m — აირის მასა

$M = m_0 N_A$ — ნივთიერების მოლური მასა

$R = k N_A = 8,31 \frac{\text{ჯ}}{\text{მოლი } K}$ — აირის უნივერსალური მუდმივა

T — ტემპერატურა კელვინის სკალით

ბოლცმანის განტოლება

$$\bar{E} = \frac{3}{2} kT \quad p = nkT$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{ჯ}}{K}$ — ბოლცმანის მუდმივა

თუ $T_1 = T_2$, $p_1 = p_2$, $V_1 = V_2$,

მაშინ $N_1 = N_2$

კლავირონის განტოლება

$m, M — const$

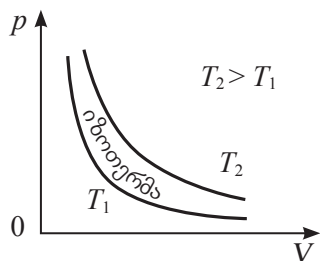
$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}$$

$$\frac{pV}{T} = const$$

აირის კანონები

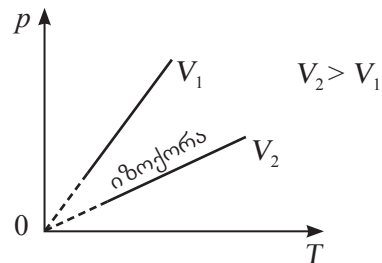
ბოილ-მარიოტის კანონი

იზოთერმული პროცესი — $T = \text{const}$
 $m, M — \text{const}$
 $pV = \text{const}$



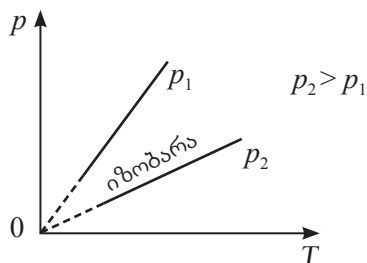
შარლის კანონი

იზოქორული პროცესი — $V = \text{const}$
 $m, M — \text{const}$
 $\frac{p_1}{T_1} = \frac{p_2}{T_2}, \quad \frac{p}{T} = \text{const}$



გეი-ლუსაკის კანონი

იზობარული პროცესი — $p = \text{const}$
 $m, M — \text{const}$
 $\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}, \quad \frac{V}{T} = \text{const}$



შინაგანი ენერგია

$$U = E_{\text{კ}} + E_{\text{პ}}$$

U — შინაგანი ენერგია

$E_{\text{კ}}$ — მოლეკულების კინეტიკური ენერგია

$E_{\text{პ}}$ — მოლეკულების პოტენციური ენერგია

იდეალური ერთატომიანი აირის შინაგანი ენერგია

$$U = \frac{2}{3} \frac{m}{M} RT$$

შინაგანი ენერგიის შეცვლის ხარხები

$$\Delta U = A + Q$$

მუშაობის შესრულება

$$\Delta U = A$$

$$A = p\Delta V$$

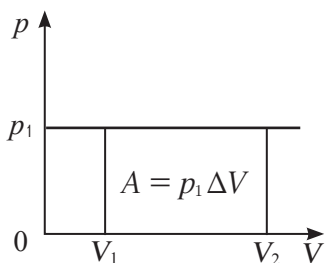
$$A = -A'$$

A — აირის მუშაობა

p — აირის წნევა

ΔV — აირის მოცულობის ცვლილება

A' — გარე ძალების მუშაობა აირზე



საწვავის წვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა

$$Q = qm$$

Q — წვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა

$q = \frac{Q}{m}$ — წვის კუთრი სითბო

m — საწვავის მასა

$$\text{SI}[q] = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კგ}}$$

სითბოს გადაცემა

თბოგამტარობა

კონვექცია

გამოსხივება

$$\Delta U = Q$$

სითბოს რაოდენობა გათბობისას ან გაცივებისას

$$Q = \pm cm(t_2 - t_1) = \pm cm\Delta t$$

Q — სითბოს რაოდენობა

c — კუთრი სითბოტევადობა

m — სხეულის მასა

t_2 — საბოლოო ტემპერატურა

t_1 — საწყისი ტემპერატურა

$$\text{SI}[c] = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კგ} \cdot \text{K}}$$

სითბოს რაოდენობა დნობისას ან გამყარებისას

$$Q = \pm \lambda m$$

λ — დნობის კუთრი სითბო

m — სხეულის მასა

$$\text{SI}[\lambda] = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კგ}}$$

სითბოს რაოდენობა ორთქლადქცევისას ან კონდენსაციისას

$$Q = \pm Lm$$

L — დნობის კუთრი სითბო

m — სხეულის მასა

$$\text{SI}[L] = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კგ}}$$

ელექტროსტატიკის კანონები

მუხტის შენახვის კანონი
ჩაკეტილი სისტემისათვის

$$q = q'$$

q — მუხტების ჯამი ურთიერთქმედებამდე

$$q = q_1 + q_2 + \dots + q_n$$

q' — მუხტების ჯამი ურთიერთქმედების შემდეგ

$$q' = q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n$$

$$\text{ე.ი. } q_1 + q_2 + \dots + q_n = \text{const}$$

ნებისმიერი მუხტი ელემენტარული მუხტის ჯერადია

$$q = en$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ კ}$$

$$\text{SI } [q] = 1 \text{ კ (კულონი)}$$

კულონის კანონი
(შარლ კულონი 1785 წ.)

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}$$

F — წერტილოვან (სფერულ) მუხტებს შორის ელექტრული ურთიერთქმედების ძალა

$$k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ნმ}^2}{\text{კ}^2} \text{ — }$$

— პროპორციულობის კოეფიციენტი

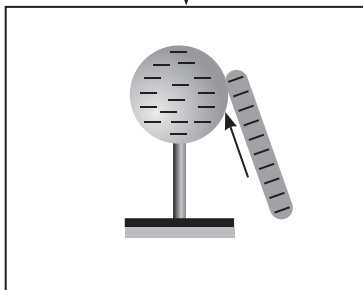
$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{კ}^2}{\text{ნმ}^2} \text{ — }$$

— ელექტრული მუდმივა

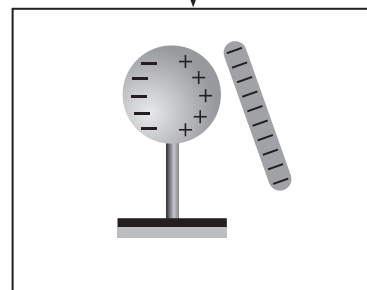
r — მანძილი წერტილოვან მუხტებს შორის (სფერული მუხტების ცენტრებს შორის)

სხეულების ელექტრიზაცია

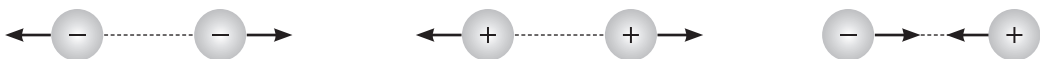
შეხებით



გავლენით

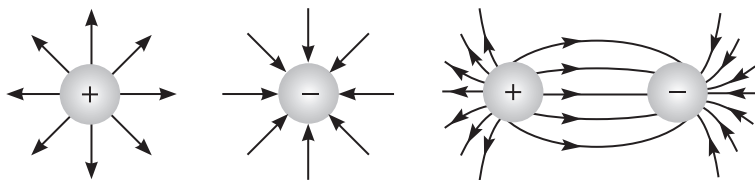


დაამუხტული სხეულების ურთიერთქმედება



ელექტრული ველი

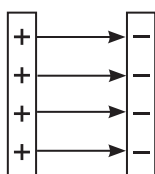
ელექტრული ველის ძალწირები



ძალწირები:

- არ არის ჩაკეტილი
- არ გადაიკვეთებიან
- უწყვეტია
- იწყება $+q$ -ზე, ბოლოვდება $-q$ -ზე

ერთგვაროვანი ელექტრული ველი



$$\vec{E} = \text{const}$$

ელექტრული ველის დაძაბულობა

$$SI [E] = 1 \text{ ნ/კ} = 1 \text{ ვ/მ}$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{|q|}, \quad E = k \frac{|q_0|}{r^2}$$

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

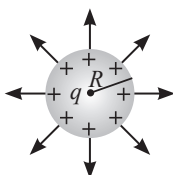
q — ველში შეტანილი მუხტი

q_0 — ველის შემქმნელი მუხტი

r — მანძილი q_0 მუხტიდან დაძაბულობის გამოსათვლელ წერტილამდე

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ნმ}^2}{\text{კ}^2}$$

დამუხტული სფეროს ველის დაძაბულობა



სფეროს გარეთ

$$E = k \frac{|q|}{r^2} \quad r \gg R$$

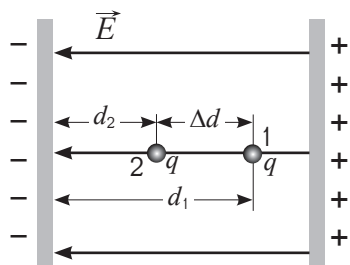
სფეროს შიგნით

$$E = 0 \quad r < R$$

ველების სუპერპოზიციის პრინციპი

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n$$

ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა



$$A = qE(d_1 - d_2) = qE\Delta d$$

$$A = -(W_{32} - W_{31}) = -\Delta W_3$$

$$W_3 = qEd$$

A — ველის მუშაობა — ელექტრულ ველში მუხტის გადაადგილებისას შესრულებული მუშაობა არ არის დამოკიდებული ტრაექტორიის ფორმაზე

$A = 0$ ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე

d_1 — სანჯისი მანძილი უარყოფითად დამუხტული ფირფიტიდან მუხტამდე

d_2 — საბოლოო მანძილი უარყოფითად დამუხტული ფირფიტიდან მუხტამდე

W_3 — მუხტის პოტენციური ენერგია ერთგვაროვან ველში

პოტენციალი

$$\varphi = \frac{W_3}{q}$$

დამოკიდებულია მუხტის პოტენციური ენერგიის ნულოვანი დონის არჩევაზე (უარყოფითად დამუხტული ფირფიტიდან)

$$SI [\varphi] = 1 \text{ ვ} = 1 \text{ ჯ/კ}$$

პოტენციალთა სხვაობა

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$$

არ არის დამოკიდებული ნულოვანი დონის არჩევაზე

$$SI [U] = 1 \text{ ვ} = 1 \text{ ჯ/კ}$$

ძაბვა

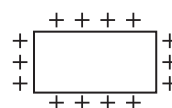
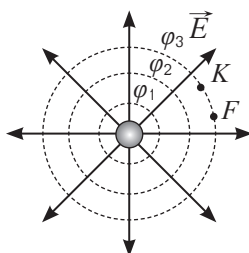
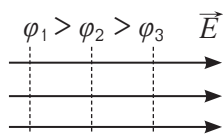
ელექტრული ველის ენერგეტიკული მახასიათებელი

$$U = \frac{A}{q} = Ed$$

$$SI [U] = 1 \text{ ვ} = 1 \text{ ჯ/კ}$$

ექვიპოტენციალური ზედაპირები (ეპზ)

პოტენციალი ზედაპირის ყველა წერტილში ერთნაირია



ნებისმიერი გამტარის ზედაპირი
ექვიპოტენციალური ზედაპირია

$$\varphi_K = \varphi_F, A_{KF} = 0 \text{ ეპზ} \perp \text{ძალწირი}$$

$$C = \frac{q}{U}$$

q — მუხტი

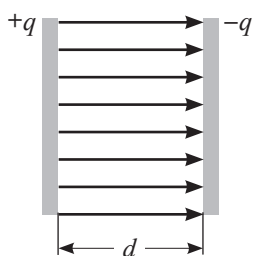
U — კონდენსატორზე მოდებული ძაბვა

C — ელექტროტევადობა —
არ არის დამოკიდებული q და U -ზე

ელექტროტევადობა დამოკიდებულია:

- გამტარების გეომეტრიულ ზომებზე
- გამტარების ფორმაზე
- გამტარებს შორის მანძილზე
- გარემოს დიელექტრიკულ შეღწევადობაზე

ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა



$$C = \frac{\epsilon \epsilon_0 S}{d}$$

ϵ — გარემოს დიელექტრიკული შეღწევადობა

ϵ_0 — ელექტრული მუდმივა

S — კონდენსატორის შემონაფენის ფართობი

d — მანძილი შემონაფენებს შორის

გამოყენება — მუხტების დამგროვებელი

დამუხტული კონდენსატორის ენერგია

$$W = q \frac{E}{2} d = \frac{qU}{2} = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}$$

ელექტრული ველის ენერგია

$$W = \frac{CU^2}{2} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2} Sd$$

ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon \epsilon_0 E^2}{2}$$

ელექტრული დენის ძალა SI $[I] = 1\text{ ა (ამპერი)}$

$$I = \frac{q}{t} \quad I = neSv$$

q — გამტარის განივკვეთში t დროში გასული მუხტი
 n — გადამტანების კონცენტრაცია
 S — გამტარის განივკვეთის ფართობი
 v — ნაწილაკების სიჩქარე
 e — ელექტრონის მუხტი

დენის მოქმედებები

სითბური

ჯოულ-ლენცის
კანონი

$$Q = I^2 R t$$

მაგნიტური

მაგნიტური ისრის
შემობრუნდება დენიანი
გამტარის მახლობლად;
დენიანი გამტარების
ურთიერთქმედება.

ქიმიური

ფარადეის I კანონი

$$m = kq = kIt$$

m — ელექტროდზე გამო-
ყოფილი ნივთიერების მასა
 q — t დროში ელექტროლიტში
გასული მუხტები
 I — დენი ელექტროლიტში
 k — ნივთიერების
ელექტროქიმიური
ეკვივალენტი

$$\text{SI } [k] = 1\text{ კგ/კ}$$

დენის მუშაობა და სიმძლავრე

მუშაობა

$$A = qU$$

რადგან $q = It$, ამიტომ $A = IUt$

$$A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

სიმძლავრე

$$P = \frac{A}{t}$$

$$P = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

$$\text{SI } [P] = 1\text{ ვტ (ვატი)} = 1\text{ ავ}$$

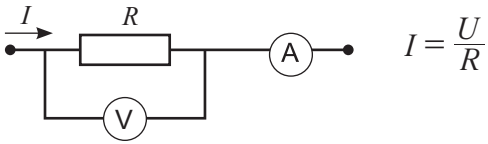
ფარადეის II კანონი

$$k = \frac{1}{F} \frac{A}{n}$$

$\frac{A}{n}$ — ქიმიური ეკვივალენტი
 F — 96 500 კ/მოლი —
ფარადეის რიცხვი
 A — ნივთიერების ატომური
მასა
 n — ნივთიერების ვალენტობა

ომის კანონი

წრედის უბნისათვის



$$I = \frac{U}{R}$$

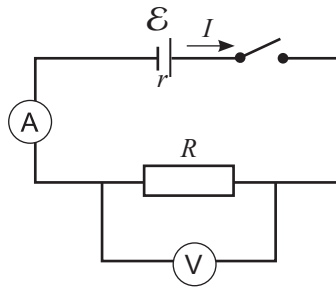
I — დენი წრედის უბანზე

U — ძაბვა წრედის უბანზე

R — წრედის ამ უბნის წინაღობა

$$R = \frac{U}{I}$$

სრული წრედისათვის



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

I — დენის ძალა მთელ წრედში

$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{გარე}}}{q}$ — დენის წყაროს ემ ძალა

$A_{\text{გარე}}$ — არაელექტრული ძალების მუშაობა

R — გარე წრედის წინაღობა

r — დენის წყაროს შიგა წინაღობა

$R + r$ — წრედის სრული წინაღობა

გამტარის წინაღობა

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

R — წინაღობა

ρ — ნივთიერების კუთრი წინაღობა

l — გამტარის სიგრძე

S — გამტარის განივკვეთის ფართობი

$$\text{SI } [R] = 1 \text{ ომი} = 1 \text{ ვ/ა}$$

$$\text{SI } [\rho] = 1 \text{ ომი} \cdot \text{მ}$$

გამტარის წინაღობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე

$$R = R_0(1 + \alpha t)$$

$$\rho = \rho_0(1 + \alpha t)$$

R_0, ρ_0 — რიცხვითი მნიშვნელობა 0°C -ზე

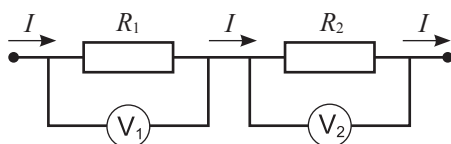
R, ρ — რიცხვითი მნიშვნელობა $t^\circ\text{C}$ -ზე

α — წინაღობის თერმული კოეფიციენტი

$$\alpha = \frac{1}{273} K^{-1}$$

გამტარების შეერთება

გამტარების მიმდევრობითი შეერთება



$$I_1 = I_2 = I$$

$$U_1 + U_2 = U$$

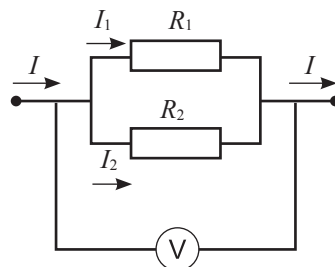
$$R = R_1 + R_2$$

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}$$

თუ $R_1 = R_2 = \dots = R_n = r,$

მაშინ $R = nr$

გამტარების პარალელური შეერთება



$$U_1 = U_2 = U$$

$$I_1 + I_2 = I$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

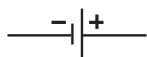
$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

თუ $R_1 = R_2 = \dots = R_n = r,$

მაშინ $R = \frac{r}{n}$

ელექტრული ხელსაწყოების სქემატური აღნიშვნები

დენის წყარო



კოჭა გულარით



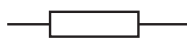
ნათურა



კონდენსატორი



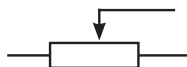
წინაღობა, რეზისტორი



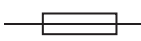
სახურებელი



რეოსტატი



დნობადი დამცველი



ელექტროზარი



ვოლტმეტრი



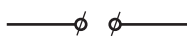
ჩამრთველი



ამპერმეტრი



მომჭერები



სადენების შეერთება



1. მექანიკური მოძრაობა

მოძრაობა სამყაროს დამახასიათებელი ყველაზე ზოგადი თვისებაა. სამყარო განუწყვეტელ, მუდმივ მოძრაობაშია. მოძრაობების სხვადასხვა ფორმებს შორის უმარტივესია მექანიკური მოძრაობა.

ყოველ სხეულს განსაზღვრული მდებარეობა უკავია სივრცეში სხვა სხეულების მიმართ. თუ დროის განმავლობაში იცვლება სხეულის მდებარეობა სივრცეში სხვა სხეულის მიმართ, მაშინ თვლიან, რომ სხეული მოძრაობს.

დროის განმავლობაში სხეულის მდებარეობის ცვლილებას სივრცეში სხვა სხეულის მიმართ მექანიკური მოძრაობა ეწოდება.

სხეულს, რომლის მიმართ მოცემული სხეული იცვლის მდებარეობას **ათვლის სხეული** ეწოდება. ათვლის სხეულად შეიძლება მივიჩნიოთ ნებისმიერი სხეული, მაგალითად: დედამიწა, შენობა, ავტომანქანა, მზე და ა. შ. ათვლის სხეული პირობითად უძრავად ითვლება სხვა სხეულის მიმართ.

ათვლის სხეულს, მასთან დაკავშირებულ კოორდინატთა სისტემას და დროის საზომ ხელსაწყოს **ათვლის სისტემა** ეწოდება.

სხეული შეიძლება ერთი ათვლის სისტემის მიმართ იყოს უძრავი, ხოლო მეორე ათვლის სისტემის მიმართ მოძრაობდეს. მაგალითად: მგზავრი ათვლის სისტემაში, რომელიც ავტობუსთანაა დაკავშირებული უძრავია, თუ ის ავტობუსში სკამზე ზის, მაგრამ მოძრავია ათვლის იმ სისტემის მიმართ, რომელიც დაკავშირებულია ქუჩაზე მდგომ დამკვირვებელთან. ამიტომ, როგორც მოძრაობა, ისე უძრავობა არ არის აბსოლუტური ანუ მოძრაობა და უძრავობა ფარდობითია.

მოძრაობის სახეებია: **გადატანითი, ბრუნვითი და რხევითი** მოძრაობები.

მოძრაობას, როდესაც სხეულის ნებისმიერი ორი წერტილის შემაერთებული მონაკვეთი თავისი თავის პარალელური რჩება, **გადატანითი მოძრაობა** ეწოდება. მაგალითად, სხეულის მოძრაობა ექსკალატორზე გადატანითი მოძრაობაა.

მოძრაობას, როდესაც სხეულის ყოველი წერტილი შემოწერს წრეწირს, რომლის ცენტრიც სხეულის ბრუნვის ღერძზე მდებარეობს, **ბრუნვითი მოძრაობა** ეწოდება. ბრუნვითი მოძრაობა პერიოდული მოძრაობაა, რადგან მას განმეორადობა ახასიათებს. მაგალითად: საათის ისრები ბრუნავენ ერთი წერტილის (ცენტრის) ირგვლივ, დედამიწა ბრუნავს თავისი წარმოსახვითი ღერძის ირგვლივ და სხვ.

მოძრაობას, როდესაც სხეული წონასწორობის მდებარეობიდან ხან ერთ, ხან მეორე მხარეს გადაიხრება, **რხევითი მოძრაობა** ეწოდება (მაგალითად, საქანელას მოძრაობა).

ზოგჯერ სხეულის მოძრაობის აღწერისათვის სხეულის ზომა შეიძლება არ გავითვალისწინოთ. **სხეულს, რომლის ზომები მოძრაობის მოცემულ პირობებში მხედველობაში არ მიიღება (უგულებელყოფილია), ნივთიერ ანუ მატერიალურ წერტილს უწოდებენ.**

ნივთიერი წერტილი ბუნებაში არ არსებობს, ის სხეულის მოდელია. თუ სხეულის ზომები გაცილებით ნაკლებია იმ მანძილთან შედარებით, რომელზეც სხეულის მდებარეობას ან მოძრაობას განიხილავენ, მაშინ დასაშვებია სხეულის ზომების უგულებელყოფა. მაგალითად: დედამიწიდან ვარსკვლავების მოძრაობაზე დაკვირვებისას მათ ზომებს არ ითვალისწინებენ. ნივთიერ წერტილს აქვს მასა, ხოლო მისი ზომა უგულებელყოფილია.

2. მოქმედებები ვექტორებსა და მათ გეგმილებზე

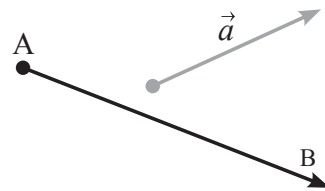
● სკალარული და ვექტორული სიდიდეები

ფიზიკის და სხვა მეცნიერებების შესწავლისას გვხვდება სხვადასხვა სახის სიდიდეები. ზოგი მათგანი სავსებით განისაზღვრება მათი რიცხვითი მნიშვნელობით. ასეთ სიდიდეებს **სკალარული** სიდიდეები ეწოდება. არსებობს სხვა სახის სიდიდეებიც, რომელთა განსაზღვრისათვის გარდა რიცხვითი მნიშვნელობისა, საჭიროა აგრეთვე მათი მიმართულების ცოდნა. ასეთ სიდიდეებს **ვექტორული სიდიდეები** ეწოდება.

წრფის მიმართული მონაკვეთი, რომელსაც აქვს **სათავე** და **ბოლო წერტილი არის ვექტორი**.

ვექტორი, რომლის სათავეა A , ხოლო ბოლო წერტილია B , აღინიშნება სიმბოლოთი $\overrightarrow{AB}$. ზოგჯერ ვექტორი აღინიშნება აგრეთვე ერთი ასოთი, მაგალითად $\vec{a}$ (სურ. 1).

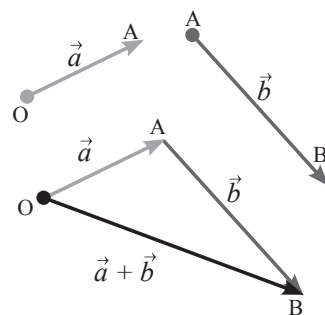
ვექტორის მოდული ეწოდება მონაკვეთის სიგრძეს მის სათავესა და ბოლო წერტილს შორის. $\overrightarrow{AB}$ ვექტორის მოდული არის $|\overrightarrow{AB}|$ ან AB . ვექტორს, რომლის მოდული ერთის ტოლია, **ერთეულოვანი ვექტორი** ეწოდება.



სურ. 1

● ვექტორების შეკრება

დაუშვათ, მოცემულია ორი $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორი. ავიღოთ სივრცის ნებისმიერი O წერტილი (სურ. 2) და ავაგოთ $\overrightarrow{OA} = \vec{a}$ ვექტორი, შემდეგ $\vec{a}$ ვექტორის ბოლო A წერტილში მოვდოთ $\overrightarrow{AB} = \vec{b}$ ვექტორი. $\overrightarrow{OB}$ ვექტორს ეწოდება $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორების ჯამი და აღინიშნება $\vec{a} + \vec{b}$ -თი. ვექტორთა შეკრების ამ წესს **სამკუთხედის წესი** ეწოდება.



სურ. 2

ვექტორთა შეკრების ეს წესი შეიძლება განვაზოგადოთ შესაკრებ ვექტორთა ნებისმიერი სასრული რაოდენობისათვის. ვთქვათ, მოცემულია რამდენიმე ვექტორი $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$ (სურ. 3 ა), იმისათვის რომ ეს ვექტორები შევკრიბოთ, ავიღოთ სივრცის ნებისმიერი O წერტილი და ავაგოთ $\overrightarrow{OA} = \vec{a}_1$ ვექტორი, შემდეგ ვექტორის ბოლო წერტილში მოვდოთ $\vec{a}_2$ ვექტორის სათავე, $\vec{a}_2$ ვექტორის ბოლო წერტილში მოვდოთ $\vec{a}_3$ ვექტორის სათავე და ა. შ.

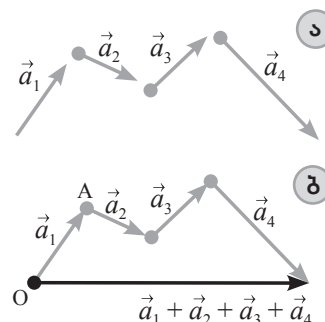
ვექტორს, რომელიც აერთებს $\vec{a}_1$ ვექტორის სათავესა და $\vec{a}_n$ ვექტორის ბოლო წერტილს ეწოდება $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \dots, \vec{a}_n$ **ვექტორების ჯამი** და ასე აღინიშნება:

$$\vec{a}_1 + \vec{a}_2 + \dots + \vec{a}_n.$$

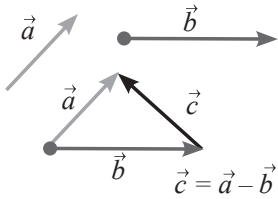
მე-3 (ბ) სურათზე ნაჩვენებია ოთხი ვექტორის შეკრების შედეგი. ვექტორთა შეკრების ოპერაციას გააჩნია შემდეგი თვისებები:

$$\vec{a} + \vec{b} = \vec{b} + \vec{a}$$

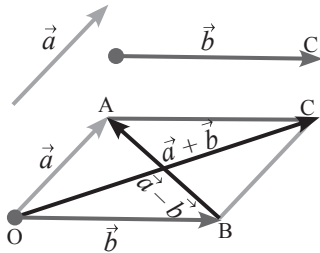
$$\vec{a} + (\vec{b} + \vec{c}) = (\vec{a} + \vec{b}) + \vec{c}$$



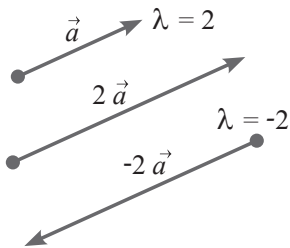
სურ. 3



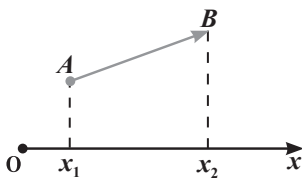
სურ. 4



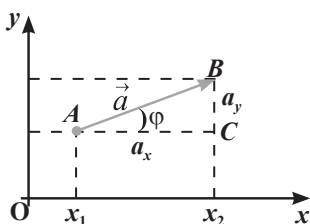
სურ. 5



სურ. 6



სურ. 7



სურ. 8

● ვექტორების სხვაობა

$\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორების სხვაობა ეწოდება $\vec{a} + (-\vec{b})$ ვექტორს და ასე აღინიშნება: $\vec{a} - \vec{b}$. ცხადია $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორების სხვაობა არის ისეთი $\vec{c}$ ვექტორი, რომ $\vec{b} + \vec{c} = \vec{a}$ (სურ. 4).

მე-5 სურათზე ნაჩვენებია ვექტორთა შეკრების კიდევ ერთი წესი, ე.წ. პარალელოგრამის წესი, რომელიც გვაძლევს აგრეთვე ვექტორთა სხვაობის აგების წესს. ვთქვათ მოცემულია ორი $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორი. ავიღოთ სივრცის ნებისმიერი O წერტილი და ავაგოთ $\vec{OA} = \vec{a}$ ვექტორი და $\vec{OB} = \vec{b}$ ვექტორი, ამ ორ ვექტორზე ავაგოთ OACB პარალელოგრამი. O წერტილიდან გამოსული $\vec{OC}$ დიაგონალი არის $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორების ჯამი, ხოლო მეორე დიაგონალი $\vec{BA}$ წარმოადგენს $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორების სხვაობას.

● ვექტორის სკალარზე გამრავლება

ვექტორის სკალარზე ნამრავლი ეწოდება ისეთ ვექტორს, რომელიც აკმაყოფილებს შემდეგ ორ პირობას:

- $|\vec{b}| = |\lambda| |\vec{a}|$ ე. ი. λ -ჯერ მეტია $\vec{a}$ სიგრძეზე. სადაც λ სკალარია.
- $\vec{a}$ და $\vec{b}$ ვექტორებს აქვთ ერთნაირი მიმართულება, თუ $\lambda > 0$ და ურთიერთსაწინააღმდეგო მიმართულება, თუ $\lambda < 0$ (სურ. 6). $\vec{a}$ ვექტორის λ რიცხვზე ნამრავლი აღინიშნება $\lambda\vec{a}$ სიმბოლოთი.

● ვექტორის გეგმილი

ვექტორის რიცხვითი მნიშვნელობის გამომანგარიშებისათვის საჭიროა კოორდინატა ღერძებზე ამ ვექტორის გეგმილების ცოდნა. $\vec{AB}$ ვექტორის გეგმილი x ღერძზე (სურ. 7) ეწოდება $x_2 - x_1$ მონაკვეთის სიდიდეს, სადაც x_1 არის A წერტილის გეგმილი x ღერძზე და x_2 არის B წერტილის გეგმილი იმავე ღერძზე. $x_2 - x_1$ მონაკვეთის სიდიდე არის ვექტორის საბოლოო და საწყისი წერტილების კოორდინატების სხვაობა. როცა ვექტორის საბოლოო და საწყისი წერტილების შესაბამისი კოორდინატების სხვაობა დადებითია, გეგმილი მოცემულ კოორდინატა ღერძზე დადებითია და პირიქით, როცა სხვაობა უარყოფითია – გეგმილი უარყოფითია.

მოცემულია $\vec{a}$ ვექტორი xOy კოორდინატა სისტემაში (სურ. 8). მაშინ მისი გეგმილი x ღერძზე იქნება $a_x = x_2 - x_1$, ხოლო y ღერძზე იქნება $a_y = y_2 - y_1$. თუ ცნობილია ამ ვექტორის a_x და a_y გეგმილები, მაშინ $\triangle ABC$ -დან პითაგორას თეორემის თანახმად $\vec{a}$ ვექტორის მოდული:

$$a = \sqrt{a_x^2 + a_y^2}.$$

$\vec{a}$ ვექტორის მიმართულების დასადგენად უნდა გამოვ-
თვალოთ φ კუთხე ფორმულიდან: $\operatorname{tg} \varphi = \frac{a_y}{a_x}$.

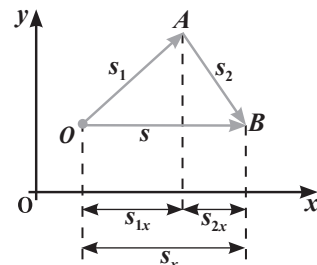
თუ ცნობილია $\vec{a}$ ვექტორის მოდული და კუთხე φ , მაშინ
გეგმილები $a_x = a \cdot \cos \varphi$, $a_y = a \cdot \sin \varphi$.

მე-9 სურათზე გამოსახულია $\vec{s}_1, \vec{s}_2$ ვექტორები და მათი
ჯამური $\vec{s}$ ვექტორი. $\vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$.

როგორც ნახაზიდან ჩანს, მათი გეგმილები x ღერძზე
შესაბამისად იქნება s, s_{1x}, s_{2x} .

ამრიგად ღერძზე ვექტორების ჯამის გეგმილი ტოლია ამ
ღერძზე შესაკრები ვექტორების გეგმილთა ალგებრული
ჯამისა.

$$s_x = s_{1x} + s_{2x}$$



სურ. 9

3. ტრაექტორია. გავლილი მანძილი. გადაადგილება

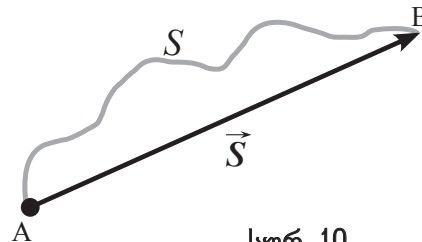
ტრაექტორია არის წირი, რომელსაც სხეული (ნივთიერი წერტილი) აღწერს მოძრა-
ობისას.

**წრფის მიმართულ მონაკვეთს, რომელიც სხეულის საწყის მდებარეობას აერთებს
მის საბოლოო მდებარეობასთან, გადაადგილება ეწოდება.**

ტრაექტორია შეიძლება არ ემთხვეოდეს სხეულის გადაადგილებას.

სხეულის მიერ დროის შუალედში ტრაექტორიის გასწვრივ გავლილი გზის სიგრძეს
გავლილი მანძილი ეწოდება. გავლილი მანძილი და გადაადგილება ფიზიკური სიდიდე-
ებია. გავლილი მანძილი აღინიშნება s ასოთი, იგი სკალარული სიდიდეა, ხოლო გადაადგი-
ლება $\vec{s}$ -ით (სურ. 10). გადაადგილება **ვექტორული**
სიდიდეა.

ტრაექტორიის ფორმის მიხედვით სხეულები შეი-
ძლება მოძრაობდნენ წრფივ ან მრუდწირულ ტრაე-
ქტორიაზე. ტრაექტორიის ფორმა ფარდობითია.
ათვლის სხვადასხვა სისტემის მიმართ ტრაექტორია
განსხვავებულია.



სურ. 10

4. წრფივი თანაბარი მოძრაობა

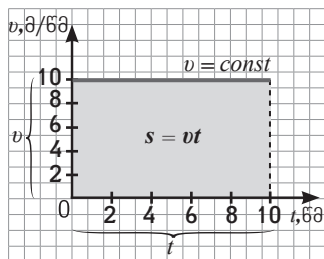
● წრფივი თანაბარი მოძრაობის სიჩქარე

მოძრაობას, როდესაც სხეული დროის ნებისმიერ ტოლ შუალედებში ერთნაირ გადაად-
გილებებს ასრულებს, **თანაბარი მოძრაობა** ეწოდება. სხეულის მდებარეობის ცვლილების
სისწრაფეს ახასიათებენ სიჩქარით. სიჩქარე ფიზიკური სიდიდეა, რომელიც გამოითვლება
გავლილი მანძილის შეფარდებით მოძრაობის დროსთან. წრფივი თანაბარი მოძრაობისას
სხეულის სიჩქარე მუდმივია. ე.ი. სიჩქარის სიდიდე და მიმართულება უცვლელია.

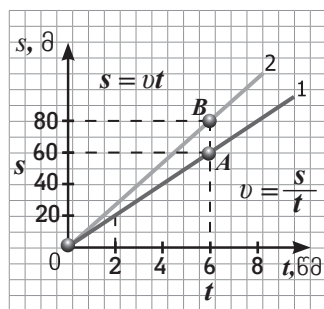
თანაბარი მოძრაობის სიჩქარე:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t}, \quad \text{აქედან} \quad \vec{s} = \vec{v}t.$$

საერთაშორისო ერთეულთა SI სისტემაში სიჩქარის ერთეულია მ/წმ.



სურ. 11



სურ. 12

• წრფივი თანაბარი მოძრაობის სიჩქარისა და გადაადგილების მოდულის გრაფიკები

წრფივი თანაბარი მოძრაობის სიჩქარის გრაფიკი დროის ღერძის პარალელური წრფეა.

მე-11 სურათზე გამოსახულია სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი, როცა $v > 0$.

გრაფიკის მიხედვით გავლილი მანძილი და გადაადგილების მოდული რიცხობრივად ტოლია იმ მართკუთხედის ფართობისა, რომელიც შემოსაზღვრულია სიჩქარის გრაფიკითა და დროის ღერძზე მონაკვეთით, რომელიც სხეულის მოძრაობის დროს გამოხატავს.

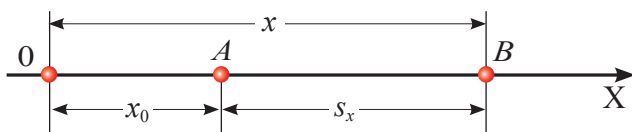
$$s = vt.$$

წრფივი თანაბარი მოძრაობის გადაადგილების მოდულის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი კოორდინატთა სათავეში გამავალი წრფეა.

მე-12 სურათზე გამოსახულია გადაადგილების მოდულის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი ორი სხვადასხვა სიჩქარისათვის. მოცემული გრაფიკის მიხედვით შესაძლებელია დადგინდეს სხეულის მოძრაობის სიჩქარე.

• წრფივი თანაბარი მოძრაობის განტოლება

დავუშვათ სხეული თანაბრად მოძრაობს x ღერძის გასწვრივ (სურ. 13).



სურ. 13

დროის ათვლის საწყისი მომენტისათვის მისი საწყისი მდებარეობა x ღერძზე არის A წერტილში, საწყისი კოორდინატით x_0 . მოძრაობის დაწყებიდან t დროის შემდეგ სხეულმა გაიარა s_x მანძილი და აღმოჩნდა B წერტილში, რომლის კოორდინატია x , მაშინ

$$x = x_0 + s_x.$$

ვინაიდან, სხეულის თანაბარი მოძრაობისას $s_x = v_x t$, ამიტომ

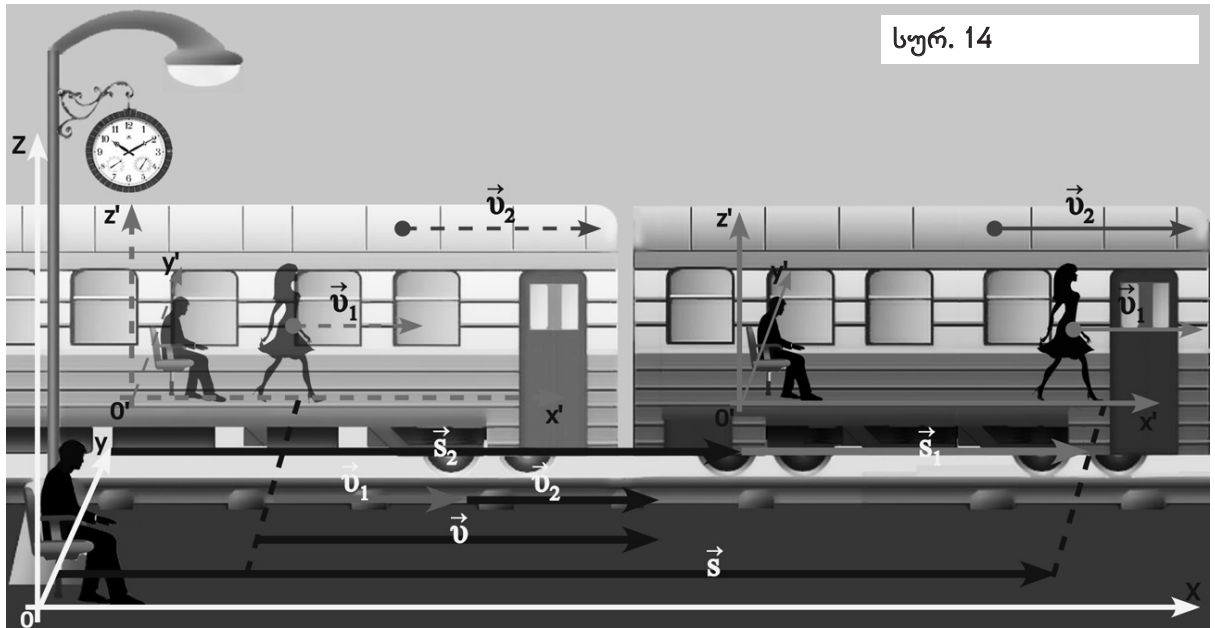
$$x = x_0 + v_x t.$$

ამ განტოლებას **წრფივი თანაბარი მოძრაობის გზის განტოლება** ეწოდება. მაშასადამე, თუ ცნობილია სხეულის სიჩქარე და მოძრაობის დრო, შეგვიძლია დავადგინოთ სხეულის მდებარეობა დროის მოცემული მომენტისათვის ან ტრაექტორიის მოცემული წერტილისათვის.

5. სიჩქარეთა შეკრების წესი

როგორც აღინიშნა ერთი და იგივე სხეული შეიძლება მექანიკურ მოძრაობას ასრულებდეს და იმავდროულად უძრავიც იყოს. ეს დამოკიდებულია ათვლის სხეულის არჩევაზე. მაგალითად, დედამიწის მიმართ მოძრავ ავტომანქანაში მჯდომი მგზავრი უძრავია სავარძლის მიმართ, ხოლო დედამიწის მიმართ კი – მოძრავი. მგზავრის სიჩქარე სხვადასხვა ათვლის სისტემის მიმართ სხვადასხვაა. მოძრავი სხეულების ტრაექტორიაც სხვადასხვა ათვლის სისტემის მიმართ განსხვავებულია. ე. ი. მოძრაობა და უძრაობა ფარდობითია.

დავუშვათ დამკვირვებელი იმყოფება სადგურის პლატფორმაზე და აკვირდება მის წინ მოძრავ მატარებელს (სურ. 14). დამკვირვებელი ჩავთვალოთ ათვლის სხეულად და დავუკავშიროთ მას კოორდინატთა სისტემა. რადგან დამკვირვებელი და მასთან დაკავშირებული ($oxyz$) კოორდინატთა სისტემა დედამიწის მიმართ უძრავია, ამიტომ იგი შეგვიძლია ჩავთვალოთ უძრავ ათვლის სისტემად.



სურ. 14

მატარებელში ზის მეორე დამკვირვებელი, რომელიც უძრავია მატარებლის მიმართ, თუმცა მატარებელთან ერთად მოძრაობს უძრავი ათვლის სისტემის ანუ პირველი დამკვირვებლის მიმართ, $\vec{v}$ სიჩქარით. დავუკავშიროთ მეორე დამკვირვებელს $o'x'y'z'$ კოორდინატთა სისტემა, რომელსაც ვუწოდოთ მოძრავი ათვლის სისტემა.

მატარებელში იმყოფება მგზავრი, რომელიც მატარებლის მიმართ $\vec{v}_1$ სიჩქარით მოძრაობს. $\vec{s}$ -ით აღვნიშნოთ მგზავრის გადაადგილება უძრავი ათვლის სისტემის – პლატფორმაზე მყოფი დამკვირვებლის მიმართ, $\vec{s}_1$ -ით მგზავრის გადაადგილება მოძრავი ათვლის სისტემის – მატარებელში მჯდომი დამკვირვებლის მიმართ, ხოლო $\vec{s}_2$ -ით მოძრავი ათვლის სისტემის გადაადგილება უძრავის მიმართ.

$$\text{მაშინ,} \quad \vec{s} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2. \quad (1)$$

თუ მოძრაობა მიმდინარეობდა t დროის განმავლობაში, მაშინ (1)-ის t -ზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\vec{v} = \frac{\vec{s}}{t} = \frac{\vec{s}_1 + \vec{s}_2}{t} = \frac{\vec{s}_1}{t} + \frac{\vec{s}_2}{t}.$$

$$\text{ამრიგად,} \quad \vec{v} = \vec{v}_1 + \vec{v}_2. \quad (2)$$

სადაც $\vec{v}$ არის მგზავრის სიჩქარე უძრავი ათვლის სისტემის მიმართ, $\vec{v}_1$ – მგზავრის სიჩქარე მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ, ხოლო $\vec{v}_2$ კი – მოძრავი ათვლის სისტემის სიჩქარე უძრავის მიმართ. მე-(2)-ს **სიჩქარეთა შეკრების ფორმულას** უწოდებენ. ამრიგად, სხეულის როგორც გადაადგილება, ასევე სიჩქარე სხვადასხვა ათვლის სისტემის მიმართ სხვადასხვაა.

სხეულის სიჩქარე უძრავი ათვლის სისტემის მიმართ ტოლია მოძრავი ათვლის სისტემის მიმართ მისი სიჩქარისა და მოძრავი სისტემის უძრავი სისტემის მიმართ სიჩქარის გეომეტრიული ჯამისა.

6. წრფივი არათანაბარი მოძრაობა

• საშუალო სიჩქარე

სხეული შეიძლება მოძრაობდეს მუდმივი ან ცვლადი სიჩქარით. მაგალითად, მატარებლის საწყისი სიჩქარე ადგილიდან დაძვრის მომენტში ნულის ტოლია. შემდეგ მისი სიჩქარე თანდათან მატულობს. ამიტომ არათანაბარ მოძრაობას ახასიათებენ **საშუალო სიჩქარით**.

არათანაბარი მოძრაობის საშუალო სიჩქარე ტოლია სხეულის მიერ მთელი მოძრაობის განმავლობაში გავლილი მანძილის შეფარდებისა მისი მოძრაობის მთელ დროსთან.

საშუალო სიჩქარე გამოითვლება ფორმულით $v_{\text{საშ}} = \frac{s}{t}$, სადაც $s = s_1 + s_2 + \dots + s_n$ არის მოძრაობისას გავლილი მანძილი, $t = t_1 + t_2 + \dots + t_n$ კი დრო, რომლის განმავლობაშიც სხეულმა ეს მანძილი გაიარა.

$$v_{\text{საშ}} = \frac{s_1 + s_2 + \dots + s_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}.$$

საშუალო სიჩქარე სკალარული სიდიდეა. ამრიგად, საშუალო სიჩქარე გვიჩვენებს, რას უდრის სხეულის მიერ გავლილი მანძილი დროის ერთეულში.

არათანაბარ მოძრაობას ახასიათებენ **მყისი სიჩქარით**. მყისი სიჩქარე არის სიჩქარე დროის მოცემულ მომენტში ან სიჩქარე ტრაექტორიის მოცემულ წერტილში.

• აჩქარება

სიჩქარის ცვლილების სისწრაფეს ახასიათებენ აჩქარებით.

აჩქარება არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ტოლია სხეულის სიჩქარის ცვლილების შეფარდებისა დროის იმ შუალედთან, რომელშიც ეს ცვლილება მოხდა.

აჩქარება ვექტორული სიდიდეა და აღინიშნება $\vec{a}$ ასოთი.

$$\vec{a} = \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t},$$

სადაც $\vec{v}_0$ საწყისი სიჩქარეა, $\vec{v}$ – საბოლოო სიჩქარე, t – დრო, რომლის განმავლობაშიც შეიცვალა სიჩქარე.

საერთაშორისო ერთეულთა SI სისტემაში აჩქარების ერთეულია მ/წმ².

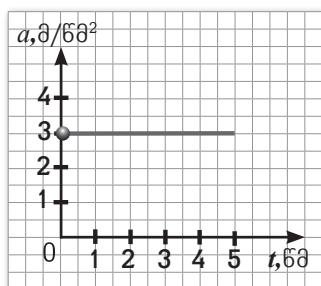
• თანაბრაჩქარებული მოძრაობა.

აჩქარების დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი

თუ სიჩქარე დროის ნებისმიერ ტოლ შუალედში ერთი და იმავე სიდიდით იცვლება (იზრდება ან მცირდება), მაშინ ასეთ მოძრაობას უწოდებენ **თანაბრაჩქარებულ მოძრაობას**. რაც მეტია სიჩქარის ცვლილება დროის ერთეულში, მით მეტია აჩქარება და პირიქით.

თანაბრაჩქარებული მოძრაობისას აჩქარება მუდმივი სიდიდეა.

თანაბრაჩქარებული მოძრაობის აჩქარების დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი დროის ღერძის პარალელური წრფეა (სურ. 15).



სურ. 15

თუ მოძრაობის სიჩქარე იზრდება, მაშინ აჩქარების რიცხვითი მნიშვნელობა დადებითია ($a > 0$). ეს ნიშნავს, რომ სიჩქარისა და აჩქარების ვექტორები ერთსა და იმავე მხარესაა მიმართული. ხოლო თუ სიჩქარე მცირდება, აჩქარების რიცხვითი მნიშვნელობა უარყოფითია ($a < 0$), სიჩქარისა და აჩქარების ვექტორები ერთმანეთის საწინააღმდეგოდ არის მიმართული.

● თანაბარჩქარეული მოძრაობის სიჩქარე

თანაბარჩქარეული მოძრაობისას საბოლოო სიჩქარე გამოთვლება ფორმულით:

$$\vec{v} = \vec{v}_0 + \vec{a}t.$$

თუ საკოორდინატო x ღერძი მიმართულია მოძრაობის მიმართულებით, მაშინ

$$v_x = v_{0x} + a_x t, \text{ როცა } a_x > 0; \quad v_x = v_{0x} - a_x t, \text{ როცა } a_x < 0.$$

7. გადაადგილება თანაბარჩქარეული მოძრაობისას

ისევე, როგორც წრფივი თანაბარი მოძრაობის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკიდან შეიძლება გავლილი მანძილის რიცხვითი მნიშვნელობის გამოთვლა, ასევე არათანაბარი მოძრაობის სიჩქარის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკიდანაც შეიძლება გავლილი მანძილის გამოთვლა.

მე-16 სურათზე გამოსახულია წრფივი თანაბარჩქარეული მოძრაობისას სიჩქარის გეგმილის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. v_{0x} – სხეულის საწყისი სიჩქარის გეგმილია, v_x კი – სიჩქარის გეგმილი t დროის შემდეგ. t დროში შესრულებული s_x გადაადგილების რიცხვითი მნიშვნელობა ტოლია $OABC$ ტრაპეციის ფართობის, რომელიც გამოისახება ფუძეების ნახევარჯამისა და სიმაღლის ნამრავლით:

$$s_x = \frac{OA + BC}{2} \cdot OC. \quad \text{ე. ი.} \quad s_x = \frac{v_{0x} + v_x}{2} \cdot t. \quad (1)$$

არათანაბარი მოძრაობისას გადაადგილების რიცხვითი მნიშვნელობა გამოითვლება ფორმულით:

$$s_x = v_{\text{საშ.}} t, \quad (2)$$

სადაც $v_{\text{საშ.}}$ არათანაბარი მოძრაობის საშუალო სიჩქარეა. თუ შევადარებთ (1) და (2) ფორმულებს, თანაბარჩქარეული მოძრაობის საშუალო სიჩქარე საწყისი და საბოლოო სიჩქარეების საშუალო არითმეტიკულის ტოლია:

$$v_{\text{საშ.}} = \frac{v_{0x} + v_x}{2}. \quad (3)$$

$$(3) \text{ ფორმულის } (2)\text{-ში ჩასმით, მიიღება } s_x = \frac{(v_{0x} + v_x)t}{2}. \quad (4)$$

$$\text{რადგან } \vec{v}_x = \vec{v}_{0x} + \vec{a}_x t, \quad \text{ამიტომ: } s_x = \frac{(v_{0x} + v_{0x} + a_x t)t}{2} = \frac{(2v_{0x} + a_x t)t}{2}.$$

$$\text{აქედან } s_x = v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}, \quad \text{ხოლო } x = x_0 + v_{0x} t + \frac{a_x t^2}{2}. \quad (5)$$

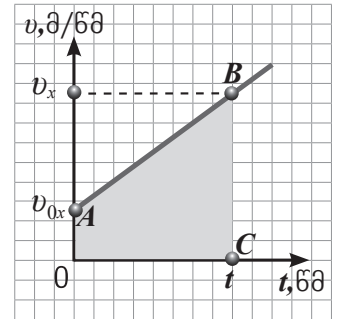
მე-17 სურათზე გამოსახულია თანაბარჩქარეული მოძრაობისას ნივთიერი წერტილის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი.

თანაბარჩქარეული მოძრაობისას გადაადგილების გეგმილის მოდული შეიძლება ასეც გამოვიანგარიშოთ:

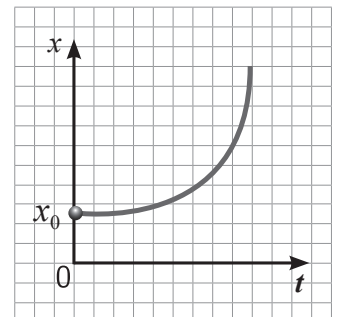
$$a_x = \frac{v_x - v_{0x}}{t} \text{ -დან, } t = \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}. \quad (6)$$

თუ (6)-დან t -ს მნიშვნელობას შევიტანთ (4)-ში,

$$\text{მაშინ } s_x = \frac{v_x + v_{0x}}{2} \cdot \frac{v_x - v_{0x}}{a_x}. \quad \text{ე. ი.} \quad s_x = \frac{v_x^2 - v_{0x}^2}{2a_x}.$$



სურ. 16



სურ. 17

8. თანაბარი მოძრაობა წრეწირზე

● პერიოდი და სიხშირე

მოძრაობას, რომლის ტრაექტორია მრუდი წირია, **მრუდწირული მოძრაობა** ეწოდება. წრეწირზე მოძრაობა მრუდწირული მოძრაობის ერთ-ერთი სახეა.

შეკრულ წირზე მოძრაობისას სხეული რაღაც დროის შემდეგ კვლავ უბრუნდება იმ წერტილს, საიდანაც დაიწყო მოძრაობა. ასეთ მოძრაობას პერიოდულ მოძრაობას უწოდებენ. წრეწირზე მოძრაობა პერიოდულია.

დროს, რომლის განმავლობაშიც სხეული ასრულებს ერთ სრულ ბრუნს, პერიოდი ეწოდება.

ბრუნვის პერიოდი აღინიშნება T ასოთი. საერთაშორისო ერთეულთა (SI) სისტემაში ბრუნვის პერიოდის ერთეულია წამი. სისტემგარეშე ერთეულია წუთი, საათი, დღე-ღამე და სხვ.

თუ სხეული რაიმე t დროში n ბრუნს ასრულებს, მაშინ ბრუნვის პერიოდი:

$$T = \frac{t}{n}.$$

დროის ერთეულში შესრულებულ ბრუნთა რიცხვს ბრუნვის სიხშირე ეწოდება. სიხშირეს აღნიშნავენ ν (ნიუ) ასოთი.

$$\nu = \frac{n}{t}. \quad \text{ე. ი.} \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

საერთაშორისო ერთეულთა (SI) სისტემაში სიხშირის ერთეულია 1 ჰერცი (**ჰც**) გერმანელი მეცნიერის ჰენრიხ ჰერცის პატივსაცემად.

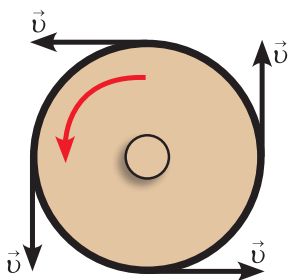
1 ჰერცი ისეთი სიხშირეა, როცა 1 წამში ერთი სრული ბრუნი სრულდება.

$$1 \text{ ჰც} = \frac{1}{\text{წმ}} = \text{წმ}^{-1}.$$

სიხშირე და პერიოდი ურთიერთშებრუნებული სიდიდეებია.

$$T = \frac{1}{\nu}, \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

● წრეწირზე მოძრაობის წირითი სიჩქარე



სურ. 18

წრეწირზე მოძრაობა ხასიათდება წირითი და კუთხური სიჩქარით.

წრეწირზე მოძრაობისას სხეულის წირით სიჩქარეს ყოველ წერტილში ამ წერტილზე გავლებული მხების მიმართულება აქვს (სურ. 18).

წრეწირზე თანაბარი მოძრაობისას წირითი სიჩქარის მოდული გამოითვლება ფორმულით:

$$v = \frac{s}{t},$$

სადაც s რკალის სიგრძეა (სურ. 19), t – რკალის გავლის დრო.

წრეწირზე ერთი შემობრუნებისას სხეულის მიერ გავლილი მანძილი წრეწირის სიგრძის ტოლია.

$$s = 2\pi R.$$

დრო, რომლის განმავლობაშიც ერთი სრული ბრუნი სრულდება, არის ბრუნვის პერიოდი – T . ამიტომ წრეწირზე მოძრაობის სიჩქარის მოდულია:

$$v = \frac{2\pi R}{T}, \quad \text{ანუ} \quad v = 2\pi R\nu.$$

● კუთხური სიჩქარე

წრენირზე ნივთიერი წერტილის A წერტილიდან B -ში გადაადგილებისას R რადიუს-ვექტორი φ კუთხით შემობრუნდება (სურ. 19). წრენირზე მოძრავი ნივთიერი წერტილის რადიუსის შემობრუნების კუთხის შეფარდებას დროსთან, რომლის განმავლობაშიც ეს შემობრუნება შესრულდა, **კუთხური სიჩქარე** ეწოდება. იგი აღინიშნება ω – ასოთი.

$$\omega = \frac{\varphi}{t}.$$

კუთხური სიჩქარის ერთეულია 1 რად/წმ.

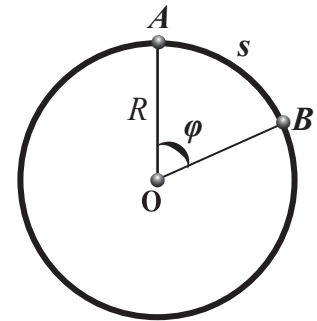
1 რადიანი არის ცენტრალური კუთხე, რომლის შესაბამისი რკალი რადიუსის ტოლია. 1 რადიანი = $360^\circ / 2 \cdot 3,14 = 57,3^\circ$.

ნივთიერი წერტილი წრენირზე ერთი სრული ბრუნის შესრულებისას შემოწერს 360° -ის ტოლ ცენტრალურ კუთხეს, რომელიც შეიცავს 2π რადიანს. ამიტომ კუთხური სიჩქარე წრენირზე მოძრაობისას ტოლია

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$$

მაშინ წირითი სიჩქარე კუთხური სიჩქარით ასე გამოისახება:

$$v = \omega R.$$



სურ. 19

9. ცენტრისკენული აჩქარება

წრენირზე მოძრაობისას ნივთიერი წერტილის (ან სხეულის) წირითი სიჩქარის ვექტორის მოდული შეიძლება იყოს მუდმივი ან ცვალებადი. თუ სიჩქარის მოდული წრენირზე მოძრაობისას არ იცვლება, მაშინ ასეთ მოძრაობას ეწოდება თანაბარი მოძრაობა წრენირზე. რადგან წრენირზე მოძრაობისას სიჩქარის, როგორც ვექტორის მიმართულება იცვლება, ამიტომ წრენირზე მოძრაობისას სხეულს ყოველთვის აქვს აჩქარება. ე.ი. წრენირზე თანაბარი მოძრაობისას სხეულის აჩქარება გამოწვეულია სიჩქარის მიმართულების ცვლილებით. ეს აჩქარება ყოველთვის მიმართულია ცენტრისკენ და მას ცენტრისკენულ აჩქარებას უწოდებენ (სურ. 20).

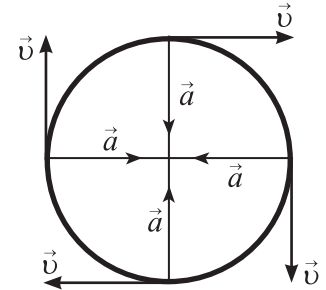
ცენტრისკენული აჩქარება გამოითვლება ფორმულით:

$$a = \frac{v^2}{R}.$$

რადგან
$$v = \frac{2\pi R}{T},$$

ამიტომ
$$a = \left(\frac{2\pi R}{T}\right)^2 \frac{1}{R} = \frac{4\pi^2 R^2}{T^2 R} = \frac{4\pi^2 R}{T^2}.$$

ანუ
$$a = 4\pi^2 \nu^2 R = \omega^2 R.$$



სურ. 20

10. ინერცია. ნიუტონის I კანონი

სხეულის მიერ უძრაობის ან წრფივი თანაბარი მოძრაობის შენარჩუნების მოვლენას ინერცია ეწოდება.

ინერცია ვლინდება ყოველდღიურ ცხოვრებაში. ტრანსპორტის დაძვრისას მგზავრი ინერციით უკან გადაიხრება, გაჩერებისას – წინ. ძრავის გამორთვისას მანქანა ინერციით განაგრძობს მოძრაობას.

ნიუტონმა დაადგინა როგორი ათვლის სისტემებისთვისაა სამართლიანი გალილეის ინერციის კანონი და მიღებული შედეგი მექანიკას დაუდო საფუძვლად.

ნიუტონის I კანონის თანახმად: არსებობს ისეთი ათვლის სისტემები, რომლის მიმართ ნივთიერი წერტილი მოძრაობს წრფივად და თანაბრად ან უძრავია, თუ მასზე სხვა სხეულები არ მოქმედებენ ან მათი მათი მოქმედება კომპენსირებულია.

ათვლის სისტემას, რომლის მიმართ სხეული, რომელზეც სხვა სხეულების მოქმედება კომპენსირებულია, ინარჩუნებს უძრაობის ან წრფივი თანაბარი მოძრაობის მდგომარეობას, **ათვლის ინერციული სისტემა** ეწოდება. ყველა სისტემა, რომელიც ამ სისტემის მიმართ უძრავია ან მოძრაობს წრფივად და თანაბრად ინერციული სისტემაა.

აჩქარებულად მოძრავ ათვლის სისტემას ათვლის **არაინერციული სისტემა** ეწოდება.

დედამიწასთან დაკავშირებული ათვლის სისტემა მიახლოებით ინერციულ სისტემად შეიძლება ჩაითვალოს დედამიწის ძალიან მცირე აჩქარების გამო მზისა და დედამიწის ლერძის მიმართ. ამიტომ დედამიწის მიმართ უძრავ ან წრფივად და თანაბრად მოძრავ ნებისმიერ სხეულთან დაკავშირებული ათვლის სისტემაც ინერციულად შეიძლება ჩავთვალოთ. თუ ათვლის ინერციული სისტემის მიმართ მოძრავ სხეულზე მოქმედი მამოძრავებელი ძალა და ხახუნის ძალა ერთმანეთის ტოლია (აკომპენსირებენ ერთმანეთს), მაშინ სხეული იმოძრავებს წრფივად და თანაბრად მანამ, სანამ მასზე სხვა სხეული არ იმოქმედებს.

ნიუტონის კანონები სამართლიანია მხოლოდ ათვლის ინერციული სისტემების მიმართ.

11. მასა

ყველა სხეულის დამახასიათებელი საერთო თვისებაა ის, რომ თუ სხეულზე სხვა სხეულები არ მოქმედებს ან მათი მოქმედება კომპენსირებულია, მაშინ იგი ინარჩუნებს უძრაობის, ან წრფივი თანაბარი მოძრაობის მდგომარეობას. სხეულის ამ თვისებას **ინერტულობას** უწოდებენ. როცა სხეული ადვილად იცვლის თავის სიჩქარეს, მაშინ სხეული ნაკლებად ინერტულია, ხოლო თუ ძნელად იცვლის – მეტად ინერტულია.

მასა სხეულის ინერტულობის ზომაა. იგი ფიზიკური სიდიდეა. მასას ზომავენ სასწორით. იგი სკალარული სიდიდეა. SI სისტემაში მასის ერთეულია 1 კგ. მასის ერთეულის 1 კგ-ის ეტალონი ინახება საფრანგეთში, ქ. სევრში ზომისა და წონის საერთაშორისო პალატაში.

მასის სისტემგარეშე ერთეულებია: 1 გ, 1 ტ და სხვ.

თუ სხეულები სინათლის სიჩქარეზე გაცილებით ნაკლები სიჩქარით მოძრაობენ, მაშინ მათი საერთო მასა თითოეული მათგანის მასათა ჯამის ტოლია. მასის ამ თვისებას **ადიტიურობას** (კრებადობას) უწოდებენ. მაგალითად: ორი სხვადასხვა სითხის ნაერთის მასა მისი შემადგენელი სითხეების მასების ჯამის ტოლია.

ორი სხვადასხვა მასის სხეულების ურთიერთქმედებისას მათი მასების შეფარდება მათი სიჩქარეების ცვლილების უკუპროპორციულია.

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\Delta v_2}{\Delta v_1}.$$

12. ძალა

ძალა სხეულების ურთიერთქმედების მახასიათებელი ვექტორული ფიზიკური სიდიდეა.

ძალის, როგორც ვექტორის არსებითი ნიშნებია: **რიცხვითი მნიშვნელობა ანუ მოდული, მიმართულება და მოდების წერტილი.**

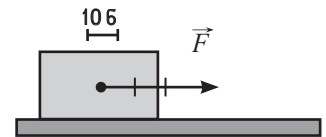
ძალა აღინიშნება $\vec{F}$ -ით.

ძალა, როგორც ფიზიკური სიდიდე, იზომება. ძალის საზომი ხელსაწყოა დინამომეტრი.

ინგლისელი მეცნიერის ისააკ ნიუტონის პატივსაცემად **SI** სისტემაში ძალის ერთეულია ნიუტონი (1 ნ).

ძალა შეიძლება გამოისახოს გრაფიკულად, ვექტორის სახით, მასშტაბის გამოყენებით.

თუ მასშტაბი 10 ნ-ია, მაშინ 21-ე სურათზე გამოსახულ სხეულზე მოქმედი ძალის სიდიდე 30 ნ იქნება.

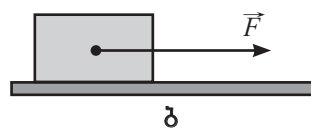
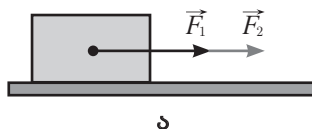


სურ. 21

ძალა სხეულის სიჩქარისა და ფორმის ცვლილების მიზეზია.

ძალას, რომელიც სხეულზე ისევე მოქმედებს, როგორც რამდენიმე ძალა ერთად, **ტოლქმედი ძალა ეწოდება.** ტოლქმედი ძალის საპოვნელად საჭიროა სხეულზე მოქმედი ძალების შეკრება.

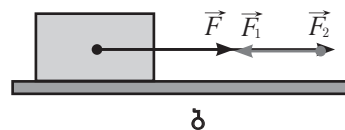
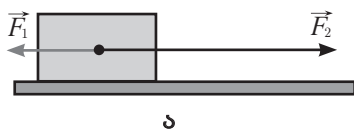
დავუშვათ სხეულზე მოქმედებს ერთი წრფის გასწვრივ, ერთმხრივ მიმართული ორი $\vec{F}_1$ და $\vec{F}_2$ ძალა (სურ. 22 ა). ტოლქმედის სიდიდე იქნება $F = F_1 + F_2$. ამ შემთხვევაში ტოლქმედის მიმართულება ემთხვევა სხეულზე მოქმედი ძალების მიმართულებას (სურ. 22 ბ).



$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

სურ. 22

თუ სხეულზე მოქმედებს ერთი წრფის გასწვრივ ერთმანეთის საწინააღმდეგოდ მიმართული $\vec{F}_1$ და $\vec{F}_2$ ძალები (სურ. 23 ა), მაშინ ტოლქმედი ძალა $\vec{F}$ მიმართული იქნება უდიდესი ძალის მხარეს (სურ. 23 ბ), ხოლო ტოლქმედის სიდიდე იქნება: $F = F_2 - F_1$.



$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2$$

$$F = F_2 - F_1$$

სურ. 23

13. ნიუტონის II კანონი

მეცნიერების მიერ ჩატარებული ექსპერიმენტების შედეგებზე დაყრდნობით გამოტანილია დასკვნა, რომელიც **ნიუტონის მეორე კანონის** სახელითაა ცნობილი.

სხეულზე მოქმედი ძალა ამ სხეულს ანიჭებს აჩქარებას, რომელიც პირდაპირპროპორციულია სხეულზე მოქმედი ძალის და უკუპროპორციულია სხეულის მასის.

ნიუტონის მეორე კანონი ვექტორული სახით შემდეგი ფორმულებით გამოისახება:

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m} \quad \text{ან} \quad \vec{F} = m\vec{a}.$$

ძალის ერთეულად მიღებულია ისეთი ძალა, რომელიც 1 კგ მასის სხეულს 1 მ/წმ² აჩქარებას ანიჭებს. ძალის ამ ერთეულს **ნიუტონი** ეწოდება.

ნიუტონის მეორე კანონის გამომსახველი ფორმულის თანახმად $1 \text{ ნ} = 1 \text{ კგ} \cdot \text{მ/წმ}^2$.

ნიუტონის მეორე კანონიც, ისევე, როგორც პირველი, სამართლიანია იმ სხეულზე-ბისთვის, რომელთა მოძრაობა განიხილება ათვლის ინერციული სისტემების მიმართ.

აჩქარებას ყოველთვის სხეულზე მოქმედი ტოლქმედი ძალის მიმართულება აქვს.

14. ნიუტონის III კანონი

ძალა, რომელიც სხეულს აჩქარებას ანიჭებს, ვერ წარმოიქმნება სხეულების ურთიერთქმედების გარეშე – იქ სადაც არის ქმედება, აუცილებლად იქნება უკუქმედება.

ძალები, რომლითაც ორი სხეული ერთმანეთზე მოქმედებს, სიდიდით ტოლია და ურთიერთსაპირისპიროდაა მიმართული

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2.$$

● ყურადღება მიაქციე შემდეგს:

მიუხედავად იმისა, რომ სხეულებზე მოქმედი ძალები სიდიდით ტოლია და ურთიერთსაპირისპიროდაა მიმართული, ისინი ერთმანეთს არ აწონასწორებენ, რადგან სხვადასხვა სხეულებზეა მოდებული. ეს ძალები თითოეულ სხეულს ანიჭებს აჩქარებას, რომელიც სხეულების მასების უკუპროპორციულია. სხეულზე მოქმედი ძალები ერთნაირი ფიზიკური ბუნებისაა.

ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად,

$$\vec{F}_1 = m_1 \vec{a}_1 \quad \text{და} \quad \vec{F}_2 = m_2 \vec{a}_2.$$

რადგან $F_1 = F_2$, ამიტომ $m_1 a_1 = m_2 a_2$,

საიდანაც
$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{m_2}{m_1}.$$

15. სიმძიმის ძალა. სიმძიმის ცენტრი

სიმძიმის ძალა არის ძალა, რომლითაც დედამიწა იზიდავს სხეულს და მიმართულია ვერტიკალურად ქვევით, დედამიწის ცენტრისაკენ.

სიმძიმის ძალა მოქმედებს დედამიწის ზედაპირთან ახლოს მყოფ ნებისმიერ სხეულზე, მიუხედავად იმისა, სხეული ვარდება დედამიწაზე თუ რაიმე საყრდენზე დევს.

სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა დამოკიდებულია სხეულის მასაზე. რაც უფრო დიდია სხეულის მასა, მით მეტი სიმძიმის ძალა მოქმედებს მასზე.

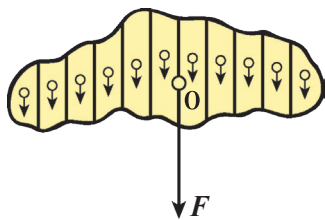
მეცნიერებმა გაზომვებით დაადგინეს, რომ **სიმძიმის ძალის შეფარდება სხეულის მასასთან მუდმივი სიდიდეა**. ეს სიდიდე აღინიშნება g ასოთი.

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}_{\text{სიმ}}}{m}.$$

დედამიწისათვის $g \approx 9,8 \text{ ნ/კგ}$. ეს ნიშნავს, რომ ნებისმიერ სხეულს, რომლის მასაა 1 კგ, დედამიწა იზიდავს 9,8 ნ ძალით, ხოლო m მასის სხეულს მიიზიდავს m -ჯერ მეტი ძალით.

$$\vec{F}_{\text{სიმ}} = m \vec{g}.$$

სიმძიმის ძალა არა მარტო დედამიწაზე, არამედ სხვა პლანეტებზეც მოქმედებს. დედამიწაზე, მთვარესა და სხვა ციურ სხეულებზე ერთმანეთისაგან განსხვავებული სიმძიმის ძალა მოქმედებს. ეს გამოწვეულია ამ ციურ სხეულებზე g -ს სხვადასხვა მნიშვნელობით.



სურ. 24

24-ე სურათზე გამოსახულია სხეულის შემადგენელ ნაწილაკებზე მოქმედი სიმძიმის ძალები.

სხეულის სიმძიმის ცენტრი ეწოდება წერტილს, რომელზეც მოდებულია ამ სხეულის შემადგენელ ნაწილაკებზე მოქმედი სიმძიმის ძალთა ტოლქმედი.

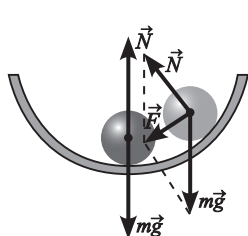
24-ე სურათზე O წერტილი სიმძიმის ცენტრია, რომელშიც თითქოს სხეულის მთელი მასაა თავმოყრილი. ამიტომაც მას მასათა ცენტრსაც უწოდებენ. O წერტილზეა მოდებული ამ

სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა.

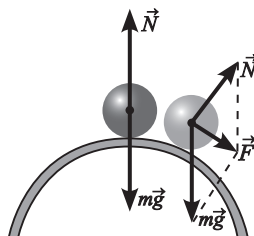
ერთგვაროვანი სხეულის მასათა ცენტრი და სიმძიმის ცენტრი ერთი და იგივე წერტილია და ემთხვევა ერთგვაროვანი სხეულის გეომეტრიულ ცენტრს.

16. სხეულთა წონასწორობის სახეები

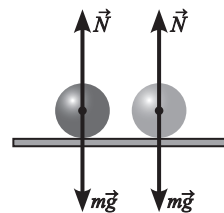
არსებობს სხეულთა წონასწორობის სამი სახე: მდგრადი, არამდგრადი და განურჩეველი (სურ. 25).



მდგრადი



არამდგრადი



განურჩეველი

სურ. 25

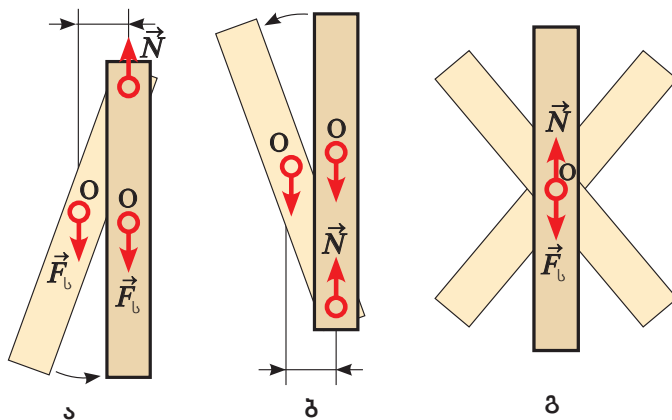
სხეული მდგრად წონასწორობაშია, თუ წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოყვანის შემდეგ იგი უბრუნდება საწყის მდებარეობას.

წონასწორობა მდგრადია, როდესაც ბრუნვის ღერძის მქონე სხეულის სიმძიმის ცენტრი წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოყვანის შემდეგ მაღლა იწევს (სურ. 26 ა). საყრდენი ფართობის მქონე სხეულის წონასწორობა მდგრადია, თუ წონასწორობიდან გამოყვანის შემდეგ სხეულის სიმძიმის ძალის ვექტორი გადის საყრდენ ფართობში (სურ. 28 ბ).

ზოგჯერ სხეული ზედაპირით კი არ ეყრდნობა საყრდენს, არამედ კონტურით შემოსაზღვრული ფართობით.

მაგალითად, ფეხებზე მდგარი შტატივის საყრდენი არის იმ კონტურით შემოსაზღვრული ფართობი, რომელიც საყრდენი ფეხების შემაერთებელი წრფეებითაა შემოსაზღვრული (სურ. 27). ამ შემთხვევაშიც თუ სიმძიმის ძალის ვექტორი კონტურით შემოსაზღვრულ ფართობში გადის, მაშინ სხეული მდგრად წონასწორობაშია.

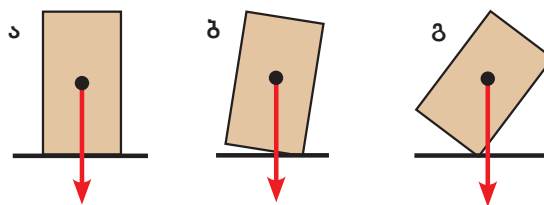
არამდგრადია წონასწორობა, თუ წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოყვანის შემდეგ სხეული აღარ უბრუნდება საწყის მდებარეობას.



სურ. 26



სურ. 27



სურ. 28

არამდგრადია წონასწორობა, თუ ბრუნვის ღერძის მქონე სხეულის სიმძიმის ცენტრი ბრუნვის ღერძის მაღლაა და წონასწორობიდან გამოყვანის შემდეგ დაბლა იწევს (სურ. 26 ბ). საყრდენი ფართობის მქონე სხეულის წონასწორობა არამდგრადია, თუ სიმძიმის ძალის ვექტორი საყრდენი ფართობის გარეთ გადის (სურ. 28 გ).

თუ ბრუნვის ღერძი ფირფიტის ცენტრში გადის და ფირფიტის ბრუნვისას არ იცვლება სიმძიმის ცენტრის მდებარეობა ბრუნვის ღერძის მიმართ (სურ. 26 გ). მაშინ სხეული იმყოფება **განურჩეველი წონასწორობის მდგომარეობაში**.

თუ წონასწორობიდან გამოყვანისას იზრდება სხეულის პოტენციური ენერგია (სხეულის სიმძიმის ცენტრი ზევით გადაადგილდება), სხეული „ცდილობს“ დაიკავოს ისეთი მდებარეობა, როცა მისი პოტენციური ენერგია მინიმალურია. ამიტომაც, რომ გაგორებული ბურთი ორმოში ჩავარდნისას, ორმოს ყველაზე ღრმა ადგილზე ჩერდება.

განურჩეველი წონასწორობის მდებარეობის მახლობელი სივრცის ყველა წერტილში სხეულს ერთი და იგივე პოტენციური ენერგია აქვს. ამიტომ სხეულისათვის ყველა ასეთი მდებარეობის დაკავება ერთნაირად ხელსაყრელია. განურჩეველ წონასწორობაშია მაგალითად, ჰორიზონტალურ ზედაპირზე გაგორებული ბურთი.

17. ბერკეტი

უძველესი დროიდან ადამიანები ცდილობდნენ შრომა გაეადვილებინათ. ისინი პირამიდების, ტაძრების და სხვა შენობების აგებისას, ტვირთის რაიმე სიმაღლეზე ასატანად ან გადასატანად იყენებდნენ დახრილ სიბრტყეს, ბერკეტებს ან ჭოჭონაქებს.

ბერკეტი, დახრილი სიბრტყე და ჭოჭონაქი მარტივი მექანიზმებია. ეს მექანიზმები თანამედროვე რთული ტექნიკის შემადგენელი ნაწილებიცაა.

მარტივი მექანიზმი ისეთი მექანიზმია, რომლითაც შესაძლებელია მცირე ძალის მოქმედებით მძიმე ტვირთის გადაადგილება.

ბერკეტი მყარი სხეულია, რომელსაც შეუძლია ბრუნვა უძრავი ღერძის გარშემო.

29-ე სურათზე ბერკეტი გამოსახულია სქემატურად. O არის ბერკეტის საყრდენი წერტილი. ბრუნვის ღერძი შეიძლება ბერკეტზე მოდებულ ძალებს შორის იყოს ან მათ გარეთ.

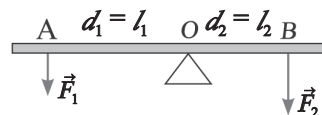
უმოკლეს მანძილს საყრდენ წერტილსა და ძალის მოქმედების წრფეს შორის ძალის მხარი ეწოდება.

ძალის მხარის საპოვნელად ბრუნვის ღერძიდან (საყრდენი O წერტილი) უნდა დავუშვათ მართობი ძალის მოქმედების წრფეზე. d_1 არის F_1 ძალის მხარი, d_2 კი F_2 ძალის მხარი.

ძალის სიდიდის ნამრავლს მისსავე მხარზე ძალის მომენტი ეწოდება.

$$M = F \cdot d.$$

SI სისტემაში ძალის მომენტის ერთეულია ნ•მ.



სურ. 29

F_2 ძალა იწვევს საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით ბერკეტის მაბრუნებელი ძალის მომენტის აღძვრას. პირობითად ის მივიჩნიოთ დადებითად.

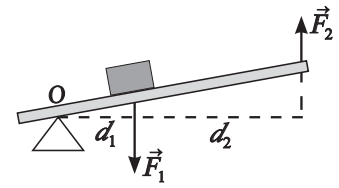
F_1 ძალა ეწინააღმდეგება ბერკეტის ბრუნვას საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით და ქმნის ბრუნვის შემაფერხებელი ძალის მომენტს. ამიტომ ამ ძალის მომენტი პირობითად მივიჩნიოთ უარყოფითად.

უძრავი ბრუნვის ღერძის მქონე ბერკეტი წონასწორობაშია, როცა ბერკეტის მაბრუნებელი დადებითი და უარყოფითი მომენტების ჯამი ნულის ტოლია, ანუ საათის ისრის მოძრაობის მიმართულებით მაბრუნებელი მომენტი ტოლია საათის ისრის მოძრაობის საწინააღმდეგო მიმართულებით მაბრუნებელი მომენტისა.

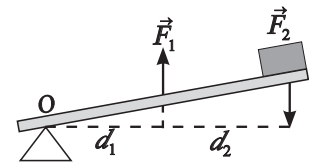
$$M_1 = M_2 \text{ ანუ } F_1 d_1 = F_2 d_2 \quad \text{და} \quad \frac{F_1}{F_2} = \frac{d_2}{d_1}.$$

ბერკეტი წონასწორობაშია, როდესაც მასზე მოქმედი ძალები ამ ძალების მხრების უკუპროპორციულია.

ბერკეტები მრავალნაირია. თუ ბერკეტზე მოქმედი ძალები საყრდენი წერტილის სხვადასხვა მხარეს არის მოდებული, ასეთ ბერკეტს **პირველი გვარის** ბერკეტს უწოდებენ (სურ. 29). **მეორე გვარისაა** ბერკეტი, თუ ტვირთი საყრდენსა და მოდებულ ძალას შორის არის მოთავსებული (სურ. 30). ბერკეტი **მესამე გვარისაა**, თუ ძალა საყრდენსა და ტვირთს შორის არის მოდებული (სურ. 31).



სურ. 30



სურ. 31

18. ჭოჭონაქი

ჭოჭონაქი ღარიანი თვალია, რომელსაც შეუძლია ბრუნვა უძრავი ღერძის გარშემო. ჭოჭონაქის ღარში მოთავსებულია ბაგირი ან ჯაჭვი. არსებობს ორგვარი ჭოჭონაქი: **მოძრავი** და **უძრავი**.

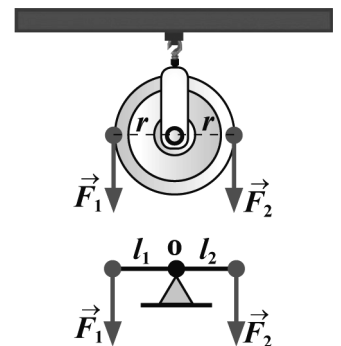
ჭოჭონაქი, რომლის ბრუნვის ღერძი დამაგრებულია ანუ ტვირთის მოძრაობისას მისი ბრუნვის ღერძი არ მოძრაობს, არის **უძრავი ჭოჭონაქი**.

უძრავი ჭოჭონაქი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ტოლმხრებიანი ბერკეტი (სურ. 32). თითოეული მხარის სიგრძე ჭოჭონაქის თვალის რადიუსის ტოლია. $l_1 = l_2 = r$, ასეთი ჭოჭონაქი არ იძლევა ძალაში მოგებას. მხოლოდ ძალას უცვლის მიმართულებას.

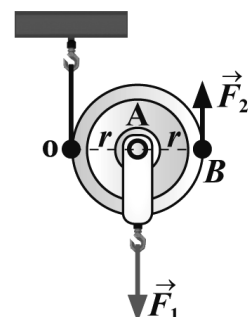
უძრავი ჭოჭონაქისათვის ერთ მხარეს მოქმედი ძალის მომენტი ტოლია მეორე მხარეს მოქმედი ძალის მომენტისა:

$$F_1 r = F_2 r, \quad F_1 = F_2.$$

ჭოჭონაქი, რომლის ბრუნვის ღერძი ტვირთთან ერთად გადაადგილდება, (აინევს ან დაინევს) არის **მოძრავი ჭოჭონაქი** (სურ. 33). მოძრავი ჭოჭონაქი შეიძლება განვიხილოთ, როგორც ბერკეტი, რომელზეც მოქმედი ძალების მხრები არ არის ტოლი. მოძრავი ჭოჭონაქისათვის O წერტილზე გადის წარმოსახვითი ბრუნვის ღერძი, რომელიც საყრდენ წერტილად ითვლება.



სურ. 32



სურ. 33

$OA = r$ არის $\vec{F}_1$ ძალის მხარი, ხოლო $OB = 2r$ არის $\vec{F}_2$ ძალის მხარი. რადგან OB მხარის სიგრძე 2-ჯერ მეტია OA მხარის სიგრძეზე, ამიტომ $\vec{F}_2$ ძალა ორჯერ ნაკლებია $\vec{F}_1$ ძალაზე. წონასწორობის პირობიდან გამომდინარე:

$$F_1 \cdot r = F_2 \cdot 2r,$$

აქედან

$$F_2 = \frac{F_1}{2}$$

მოდრავი ჭოჭონაქი ძალაში ორჯერ მოგებას იძლევა.

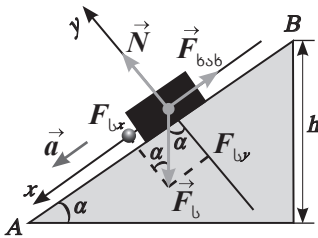
მარტივი მექანიზმებით რამდენჯერაც ვიგებთ ძალაში, იმდენჯერ ვაგებთ მანძილში და პირიქით, მაგრამ მუშაობაში არც ვიგებთ და არც ვაგებთ. ეს დებულება ცნობილია როგორც „მექანიკის ოქროს წესი“.

19. მოძრაობა დახრილ სიბრტყეზე

მარტივი მექანიზმების ერთ-ერთი სახე არის დახრილი სიბრტყე.

დახრილი სიბრტყით სხეულების ატანისას იმდენჯერ ვიგებთ ძალაში, რამდენჯერაც ვაგებთ მანძილში.

$$\frac{F}{mg} = \frac{h}{AB},$$



სურ. 34

სადაც F დახრილი სიბრტყის გასწვრივ სხეულზე მოქმედი ძალის მოდულია, mg – სხეულის სიმძიმის ძალის მოდული, h – სიმაღლე, AB – დახრილი სიბრტყის სიგრძე (სურ. 34).

დახრილ სიბრტყეზე მოძრაობისას სხეულზე მოქმედებს რამდენიმე ძალა ერთად. ამიტომ სხეულის მოძრაობას ან წონასწორობას განაპირობებს ამ ძალების ტოლქმედი ძალა, რომლისათვის ნიუტონის კანონები სამართლიანია.

ამოცანა

დახრილ სიბრტყეზე მოძრაობს m მასის ძელაკი, ძელაკის დახრილობის კუთხეა α , ხახუნის კოეფიციენტი – μ . იპოვე ძელაკის აჩქარება.

ამოხსნა

ძელაკზე სამი ძალა მოქმედებს (სურ. 34): $\vec{F}_b = m\vec{g}$ სიმძიმის ძალა, საყრდენის $\vec{N}$ რეაქციის ძალა, იგივე დრეკადობის ძალა და $\vec{F}_{bxb}$ ხახუნის ძალა. სამივე ძალის მოქმედება ერთად ძელაკს ანიჭებს $\vec{a}$ აჩქარებას, რომელიც სიბრტყის გასწვრივ ქვევით არის მიმართული. ნიუტონის მეორე კანონი ასე ჩაიწერება:

$$m\vec{a} = m\vec{g} + \vec{N} + \vec{F}_{bxb}. \quad (1)$$

აჩქარების რიცხვითი მნიშვნელობის გამოსათვლელად უნდა ვიპოვოთ სხეულზე მოქმედი ძალების გეგმილები x და y ღერძებზე. x ღერძი მივმართოთ დახრილი სიბრტყის პარალელურად, y ღერძი კი – მის მართობულად. დავაგეგმილოთ (1) განტოლება x ღერძზე. x ღერძზე საყრდენის $\vec{N}$ რეაქციის ძალის გეგმილი ნულის ტოლია, ვინაიდან ეს ვექტორი x ღერძის მართობია:

$$a_x = a, \quad F_x = mgsina, \quad F_{bxbx} = -F_{bxb} \quad N_x = 0.$$

მაშასადამე:

$$ma = mgsina - F_{bxb}. \quad (2)$$

დავაგეგმილოთ (1) განტოლება y ღერძზე. $a_y = 0$ ($\vec{a}$ ვექტორი y ღერძის მართობია).

$$F_{by} = -mgcosa.$$

საყრდენის რეაქციის $\vec{N}$ ძალის ვექტორის გეგმილი დადებითია და მისი მოდულის ტოლია. $F_{\text{ბაბ}}$ და ma გეგმილი ნულის ტოლია. მაშასადამე (1) განტოლების y ღერძზე დაგეგმილებით მიიღება: $0 = N - mg \cos \alpha$, საიდანაც $N = mg \cos \alpha$.

ხახუნის ძალა, მოდულით μN -ის ტოლია. ამიტომ, $F_{\text{ბაბ}} = \mu mg \cos \alpha$.

ხახუნის ძალის ეს გამოსახულება ჩავსვით (2) განტოლებაში, მიიღება:

$$ma = mg \sin \alpha - \mu mg \cos \alpha.$$

ამრიგად, დახრილ სიბრტყეზე ხახუნის არსებობისას აჩქარების გამოსათვლელად მიიღება შემდეგი ფორმულა: $a = g(\sin \alpha - \mu \cos \alpha)$.

აჩქარება დახრილ სიბრტყეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე ნაკლებია. თუ ხახუნი არ არის $\mu = 0$ ეს აჩქარება მაინც ნაკლებია თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე.

$$a = g \sin \alpha.$$

თუ დავუშვებთ, რომ ხახუნის ძალა ნულის ტოლია, მაშინ $ma = mg \sin \alpha$.

34-ე სურათის მიხედვით: $\sin \alpha = \frac{h}{AB}$. ე. ი. $\frac{ma}{mg} = \frac{h}{AB}$, ანუ $\frac{F}{mg} = \frac{h}{AB}$, საიდანაც მიიღება „მექანიკის ოქროს წესის“ დამადასტურებელი განტოლება:

$$F \cdot AB = mgh.$$

ე. ი. შესრულებული მუშაობები ტვირთის ატანისას დახრილი სიბრტყის გასწვრივ და ვერტიკალურად ზევით ერთმანეთის ტოლია, თუ $\mu = 0$. ამრიგად დახრილი სიბრტყით ტვირთის ატანისას ვიგებთ ძალაში მაგრამ ვაგებთ მანძილში.

დახრილი სიბრტყე ფართოდ გამოიყენება პრაქტიკაში, რადგან მასზე მოძრაობისას აჩქარება ყოველთვის ნაკლებია თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაზე. ე. ი. სხეულზე მოქმედი ძალა ნაკლებია მის სიმძიმის ძალაზე.

თუ სხეული თანაბრად მოძრაობს დახრილ სიბრტყეზე, მაშინ $a = 0$, $mg \sin \alpha = \mu mg \cos \alpha$.

აქედან

$$\mu = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha.$$

● მარტივი მექანიზმის მარგი ქმედების კოეფიციენტი

დახრილი სიბრტყის მეშვეობით სხეულების გარკვეულ h სიმაღლეზე ატანისას სრული მუშაობის ($A_{\text{სრ}}$) ნაწილი ხახუნის დაძლევის ხმარდება ($A_{\text{ბაბ}}$), ნაწილი კი სხეულის პოტენციური ენერგიის გაზრდას ($A_{\text{საბ}} = mgh$). $A_{\text{სრ}}$ არის დახრილი სიბრტყის გასწვრივ გადაადგილებისას შესრულებული სრული მუშაობა.

სიდიდეს, რომელიც გვიჩვენებს შესრულებული მუშაობის რა ნაწილი მოხმარდა სასარგებლო მუშაობას, არის **მექანიზმის მარგი ქმედების კოეფიციენტი** (შემოკლებით **მქკ**). მარგი ქმედების კოეფიციენტი აღინიშნება η (ბერძნული ასო „ეტა“) ასოთი.

მექანიზმის მარგი ქმედების კოეფიციენტი ეწოდება სასარგებლო მუშაობის შეფარდებას ამ მექანიზმის მიერ შესრულებულ სრულ მუშაობასთან. მქკ გამოი-სახება პროცენტებით.

$$\eta = \frac{A_{\text{საბ}}}{A_{\text{სრ}}} \cdot 100\%.$$

სადაც $A_{\text{საბ}}$ არის სასარგებლო მუშაობა, $A_{\text{სრ}}$ – სრული მუშაობა.

$$A_{\text{სრ}} = mgh + A_{\text{ბაბ}}.$$

ამიტომ დახრილი სიბრტყის მქ კოეფიციენტი

$$\eta = \frac{mgh}{mgh + A_{\text{ბაბ}}} \cdot 100\%.$$

ხახუნის ძალის შემცირებით იზრდება დახრილი სიბრტყის მარგი ქმედების კოეფიციენტი. მარგი ქმედების კოეფიციენტი, პრაქტიკულად ყოველთვის, ნაკლებია 100%-ზე.

20. მსოფლიო მიზიდულობის ძალა

ნიუტონმა განაზოგადა დედამიწისა და მის გარშემო სხეულების (მათ შორის მთვარის) ურთიერთქმედების მოვლენა და დაადგინა კანონი, რომელსაც მსოფლიო მიზიდულობის კანონი უწოდა.

ნებისმიერი ორი სხეული ურთიერთმიზიდება ძალით, რომლის მოდული პირდაპირპროპორციულია ამ სხეულების მასების ნამრავლისა და უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატისა.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}.$$

მსოფლიო მიზიდულობის კანონი სამართლიანია ნივთიერი ნერტილებისთვის და ერთგვაროვანი სფერული ფორმის სხეულებისათვის.

m_1 და m_2 – სფერულ სხეულთა (ან ნივთიერ ნერტილთა) მასებია, r – სხეულების ცენტრებს შორის მანძილი.

G -ს მსოფლიო მიზიდულობის ანუ **გრავიტაციული მუდმივა** ეწოდება. G -ს რიცხვითი მნიშვნელობა ექსპერიმენტულად დაადგინა ინგლისელმა მეცნიერმა ჰენრიხ კევენდიშმა.

გრავიტაციული მუდმივა რიცხობრივად ტოლია 1 მ-ით დაშორებული თითო კგ მასის ორ სხეულს შორის ურთიერთმიზიდულობის ძალისა.

$$G = 0,0000000000667 \text{ ნ}\cdot\text{მ}^2/\text{კგ}^2 = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ ნ}\cdot\text{მ}^2/\text{კგ}^2.$$

გრავიტაციული ძალა იმდენად მცირეა, რომ პრაქტიკულად შეუმჩნეველია ჩვენს გარშემო არსებული სხეულების ურთიერთმიზიდულობა. მნიშვნელოვანია მხოლოდ მათი დედამიწის მიმართ მიზიდულობა დედამიწის ძალიან დიდი მასის გამო.

დედამიწის მახლობლობაში მოქმედ გრავიტაციულ ძალას **სიმძიმის ძალას** უწოდებენ.

21. სხეულთა თავისუფალი ვარდნის აჩქარება

გალილეო გალილეიმ აღმოაჩინა, რომ თავისუფალი ვარდნა არის თანაბარაჩქარებული მოძრაობა. **სიმძიმის ძალის მოქმედებით სხეულის ვარდნას უჰაერო სივრცეში თავისუფალი ვარდნა ეწოდება.**

დედამიწის მიზიდულობა ყველა სხეულს ერთსა და იმავე აჩქარებას ანიჭებს, თუ ჰაერის წინააღმდეგობა უმნიშვნელოა ან საერთოდ არ არის.

თავისუფალი ვარდნის აჩქარება ვექტორული სიდიდეა. ის ყოველთვის მიმართულია დედამიწის ცენტრისაკენ და ერთი და იგივეა ნებისმიერი სხეულისათვის. თავისუფალი ვარდნის აჩქარების საშუალო მნიშვნელობაა $g = 9,8 \text{ მ/წმ}^2$. იგი დედამიწის სხვადასხვა ადგილზე მცირედ განსხვავდება ერთმანეთისაგან. ეს განპირობებულია დედამიწის არასფერული ფორმით, დღეღამური ბრუნვით და დედამიწის წიაღში ნივთიერების არათანაბარი განაწილებით.

თავისუფალი ვარდნის აჩქარება ნებისმიერი პლანეტისათვის გამოითვლება ფორმულით:

$$g = G \frac{M}{R^2}. \quad (1)$$

ხოლო პლანეტიდან h მანძილზე – ფორმულით:

$$g = G \frac{M}{(R + h)^2}. \quad (2)$$

მთვარეზე თავისუფალი ვარდნის აჩქარებაა $1,7 \text{ მ/წმ}^2$. ამიტომ სხეულებს მთვარეზე აქვთ უფრო ნაკლები სიმძიმის ძალა, ვიდრე დედამიწაზე. (2) ფორმულის თანახმად, დედამიწის ზედაპირიდან სიმაღლის ზრდასთან ერთად თავისუფალი ვარდნის აჩქარება და შესაბამისად, სიმძიმის ძალა თანდათან მცირდება.

თავისუფალი ვარდნისას სხეულის მიერ გავლილი მანძილი გამოითვლება ფორმულით:

$$h = h_0 + v_0 t + \frac{gt^2}{2}$$

ან

$$h = \frac{v^2 - v_0^2}{2g}.$$

სიჩქარის მოდული დროის ნებისმიერ მომენტში

$$v = v_0 + gt.$$

სადაც v_0 და v -ით აღნიშნულია, შესაბამისად, სხეულის საწყისი და საბოლოო სიჩქარის მოდული, h_0 და h – სხეულის საწყისი და საბოლოო სიმაღლე, t – თავისუფალი ვარდნის დრო.

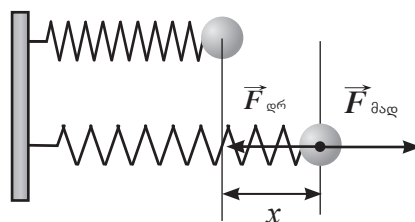
სხეულები ვარდნისას მოძრაობენ g აჩქარებით, ვერტიკალურად ზევით მოძრაობენ $-g$ აჩქარებით. ამიტომ ზემოთმოყვანილ ფორმულებში ეს უნდა გავითვალისწინოთ. თუ $v_0 = 0$, მაშინ

$$h = \frac{gt^2}{2}.$$

22. დრეკადობის ძალა

სხეულების დეფორმაციისას (გაჭიმვისას, შეკუმშვისას, ღუნვისას და გრეხისას) აღიძვრება დეფორმაციის საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალა, რომელსაც **დრეკადობის ძალას** უწოდებენ (სურ. 35).

ინგლისელი მეცნიერი რობერტ ჰუკი იკვლევდა სხეულების დეფორმაციას და მივიდა დასკვნამდე, რომ **სხეულის მცირე დეფორმაციისას აღძრული დრეკადობის ძალა დეფორმაციის სიდიდის პირდაპირპროპორციულია და მიმართულია ამ დეფორმაციის გამომწვევი ძალის საწინააღმდეგოდ**. ეს დასკვნა ცნობილია ჰუკის კანონის სახელწოდებით.



სურ. 35

$$(F_{\text{დრ}})_x = -kx,$$

სადაც k არის პროპორციულობის კოეფიციენტი, რომელსაც სხვაგვარად სიხისტესაც უწოდებენ. x – დეფორმაციის სიდიდე, ანუ ზამბარის ნაგრძელების ან შეკუმშვის სიდიდეა. ნიშანი „–“ გვიჩვენებს, რომ სხეულის შემადგენელი ნაწილაკების გადაადგილების მიმართულება და დრეკადობის ძალა ერთმანეთის საწინააღმდეგოდაა მიმართული.

$$k = \frac{F_{\text{დრ}}}{x}.$$

მოცემული სხეულისთვის იგი მუდმივი სიდიდეა. სიხისტის ერთეული SI სისტემაში არის 1 ნ/მ.

სხეულის სიხისტე დამოკიდებულია სხეულის ზომებზე და იმ მასალის გვარობაზე, რომლისგანაც იგია დამზადებული. ამიტომ ზოგადად

$$k = E \frac{S}{L_0},$$

სადაც S არის სხეულის განივკვეთის ფართობი, L_0 – მისი საწყისი სიგრძე. პროპორციულობის E კოეფიციენტს ეწოდება **დრეკადობის მოდული**, ან **იუნგის მოდული**. იგი ნივთიერების დამახასიათებელი სიდიდეა.

იუნგის მოდული იზომება პასკალებში და მოცემულია ცხრილის სახით სხვადასხვა ნივთიერებისათვის.

რაც უფრო მეტია სხეულის სიხისტე, მით მეტი ძალაა საჭირო მისი დეფორმაციისთვის.

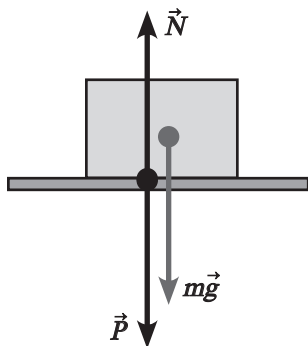
საყრდენში აღძრულ დრეკადობის ძალას **საყრდენის რეაქციის ძალას** ($\vec{N}$) უწოდებენ, ხოლო საკიდელში აღძრულ დრეკადობის ძალას კი – **დაჭიმულობის ძალას** ($\vec{T}$).

23. სხეულის წონა

საყრდენზე მოთავსებული სხეული სიმძიმის ძალით აწევს მას. ასევე საკიდელზე დაკიდებული სხეულიც – სიმძიმის ძალის მოქმედებით ჭიმავს საკიდელს. ამიტომ საყრდენიც და საკიდელიც დეფორმირდება.

საყრდენის დეფორმაციისას აღძრულ დრეკადობის ძალას უწოდებენ **საყრდენის რეაქციის ძალას**, საკიდელის დეფორმაციისას აღძრულ დრეკადობის ძალას – **დაჭიმულობის ძალას**.

ძალა, რომლითაც სხეული დედამიწის მიზიდულობის გამო აწევს საყრდენს ან ჭიმავს საკიდელს, არის სხეულის წონა.



სურ. 36

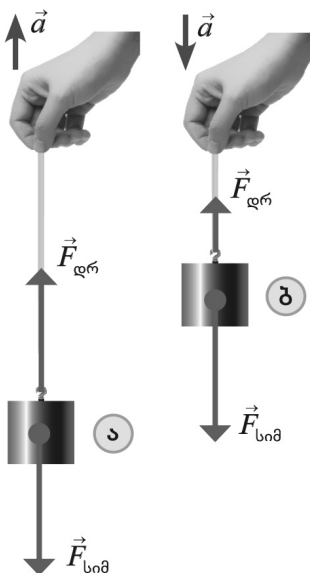
სხეულის წონა მოდებულია საყრდენზე ან საკიდელზე და მიმართულია საყრდენის ზედაპირის მართობულად დედამიწისკენ.

რადგან წონა ძალაა, მისი ერთეულიც 1 ნიუტონია. წონა აღინიშნება $\vec{P}$ ასოთი. როცა სხეული დედამიწის მიმართ უძრავ ჰორიზონტალურ საყრდენზე დევს ან უძრავ საკიდელზეა, მაშინ სხეულის წონის რიცხვითი მნიშვნელობა სიმძიმის ძალის ტოლია

$$P = F_{\text{სიმ}} = mg.$$

36-ე სურათზე mg სიმძიმის ძალაა, მოდებულია სხეულის სიმძიმის ცენტრზე; $\vec{P}$ სხეულის წონაა, მოდებულია საყრდენზე; $\vec{N}$ საყრდენის რეაქციის ძალაა.

• აჩქარებულად მოძრაობი სხეულის წონა



სურ. 37

ცდებისა და დაკვირვებების შედეგად დაადგინეს: თუ ტვირთი აჩქარებულად მოძრაობს ზევით, საკიდზე ან საყრდენში აღძრული დრეკადობის ძალა მეტია სხეულზე მოქმედ სიმძიმის ძალაზე. ეს ნიშნავს, რომ სხეულის წონა მეტია სიმძიმის ძალაზე (სურ. 37 ა).

თუ ტვირთი აჩქარებულად მოძრაობს ქვევით, მასზე მოქმედი სიმძიმის ძალა მეტია საკიდზე ან საყრდენში აღძრულ დრეკადობის ძალაზე და სხეულის წონა ნაკლებია სიმძიმის ძალაზე (სურ. 37 ბ).

ტვირთის აჩქარებულად ზევით მოძრაობისას

$$F_{\text{დრ}} - F_{\text{სიმ}} = ma.$$

აქედან,

$$F_{\text{დრ}} = F_{\text{სიმ}} + ma.$$

$$F_{\text{სიმ}} = mg, \quad \text{ამიტომ} \quad F_{\text{დრ}} = mg + ma = m(g + a).$$

ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად რა ძალითაც სხეული მოქმედებს საკიდზე, იმავე ძალით საკიდი მოქმედებს სხეულზე – ეს ძალა კი სხეულის წონაა: $F_{\text{დრ}} = P$, ე. ი. სხეულის წონა $P = m(g + a)$.

ანალოგიურად, ტვირთის აჩქარებულად ქვევით მოძრაობისას $F_{\text{სიმ}} - F_{\text{დრ}} = ma$ და $F_{\text{დრ}} = P = m(g - a)$.

იმ შემთხვევაში, თუ სხეული საკიდთან ან საყრდენთან ერთად ვარდება ვაკუუმში (უჰაერო სივრცეში), მაშინ მისი აჩქარება $a = g$ და $P = m(g - g) = 0$.

თუ სხეულის წონა ნულის ტოლია, მაშინ სხეულის ასეთ მდგომარეობას **უწონობა**ს უწოდებენ. უწონობის მდგომარეობაშია ყველა ის სხეული, რომელიც თავისუფლად ვარდება.

თუ რეზინის ზონარს ხელს გავუშვებთ, იგი დაიწყებს ვარდნას და ზონარი გაუჭიმავ მდგომარეობაში აღმოჩნდება. ანუ ზონარი ტვირთთან ერთად უწონობის მდგომარეობაშია. დედამიწის გარშემო, ორბიტაზე მოძრავ კოსმოსურ რაკეტაში მყოფი კოსმონავტები, უწონობის მდგომარეობაში არიან. მეორე მხრივ, რაკეტის სტარტისას კოსმონავტების წონა რამდენჯერმე იზრდება მნიშვნელოვანი აჩქარების გამო.

სიმძიმის ძალის საპირისპირო მიმართულებით აჩქარებულად მოძრავი სხეულის წონის შეფარდებას ამავე სხეულის სიმძიმის ძალასთან **გადატვირთვა (n)** ეწოდება.

$$n = \frac{P}{F_b} = \frac{m(g + a)}{mg} = \frac{g + a}{g}.$$

24. ხახუნის ძალა

ერთი სხეულის მეორე სხეულის ზედაპირზე ამოძრავებისას აღიძვრება ხახუნის ძალა, რომელიც ხელს უშლის სხეულების ერთმანეთის მიმართ მოძრაობას. ხახუნის ძალა მიმართულია შემხები ზედაპირების გასწვრივ მოძრაობის ფარდობითი სიჩქარის საწინააღმდეგოდ (სურ. 38).



სურ. 38

განასხვავებენ სამი სახის ხახუნის ძალას: **უძრაობის, სრიალის და გორვის.**

უძრაობის ხახუნის ძალა აღიძვრება და მოქმედებს უძრავ სხეულზე მაშინ, როდესაც რაიმე ძალით უშედეგოდ ცდილობენ მის ამოძრავებას. წვეის ძალის ზრდასთან ერთად ხახუნის ძალა მატულობს. ამიტომ სხეულის ამოძრავებამდე უძრაობის ხახუნის ძალა წვეის ძალის ტოლია და მის საპირისპიროდ არის მიმართული. სხეულის ამოძრავების მომენტი აღძრული უძრაობის ხახუნის ძალა მაქსიმალურია. იგი მეტია სრიალის ხახუნის ძალაზე. ამიტომ სხეულის ადგილიდან დაძვრა უფრო ძნელია, ვიდრე მისი გასრიალება.

მოძრაობის დაწყების მომენტიდან სხეულზე მოქმედ ხახუნის ძალას **სრიალის ხახუნის ძალას** უწოდებენ.

ხახუნის ძალა პირდაპირპროპორციულია საყრდენის რეაქციის ძალის.

$$F_{\text{ხხ}} = \mu N.$$

სადაც μ ხახუნის კოეფიციენტი, N – საყრდენის რეაქციის ძალა.

ხახუნის ძალა დამუკიდებულია შემხები ზედაპირების მასალაზე და დამუშავების ხარისხზე. იგი არ არის დამოკიდებული შემხები ზედაპირების ფართობზე. ჰორიზონტალურ ზედაპირზე სხეულების მოძრაობისას ხახუნის ძალა სიმძიმის ძალის პროპორციულია.

$$F = \mu mg.$$

სხეულის გორვისას **აღიძვრება გორვის ხახუნის ძალა**. თუ სხეული თანაბრად მოძრაობს, წვეის ძალა ხახუნის ძალის ტოლია.

სხეულის სითხეში ან აირში მოძრაობისას აღიძვრება ხახუნი, რომელსაც **სველ ხახუნს** უწოდებენ. ამ დროს სხეულსა და სითხეს (აირს) შორის აღძრულ ხახუნის ძალას **წინააღმდეგობის ძალა** ეწოდება.

სველი ხახუნისას უძრაობის ხახუნის ძალა არ არსებობს. ამიტომ სხეულების ამოძრავება სითხეში და აირში უფრო ადვილია, ვიდრე მშრალ ზედაპირზე. წინააღმდეგობის ძალა დამოკიდებულია სითხის გვარობაზე. რაც უფრო ბლანტია სითხე, მით მეტია წინააღმდეგობის ძალა. წინააღმდეგობის ძალა დამოკიდებულია აგრეთვე სითხეში მოძრავი სხეულის ფორმაზე.

25. ნივთიერების სიმკვრივე

სხეულის მასის შეფარდებას მის მოცულობასთან ნივთიერების სიმკვრივე ეწოდება.

$$\rho = \frac{m}{V},$$

სადაც ρ (რო) ნივთიერების სიმკვრივეა, m სხეულის მასა და V მისი მოცულობა.

ნივთიერების სიმკვრივე რიცხობრივად ამ ნივთიერების ერთეულოვანი მოცულობის მასის ტოლია.

სიმკვრივის ერთეული SI სისტემაში არის 1 კგ/მ^3 . სიმკვრივის ერთეულია აგრეთვე 1 გ/სმ^3 .

სიმკვრივის ფორმულიდან გამომდინარე:

$$m = \rho \cdot V \quad \text{და} \quad V = \frac{m}{\rho}.$$

სხვადასხვა ნივთიერებას განსხვავებული სიმკვრივე აქვს. მაგალითად: წყლის სიმკვრივეა 1000 კგ/მ^3 , ოქროს სიმკვრივეა 19300 კგ/მ^3 . ნივთიერების სიმკვრივე ამ ნივთიერების ერთეულოვანი მოცულობის მასის ტოლია (წყლისთვის სიმკვრივის მნიშვნელობა მიუთითებს იმაზე, რომ 1 მ^3 მოცულობის წყლის მასაა 1000 კგ).

სიმკვრივე სკალარული სიდიდეა. ნივთიერების სიმკვრივე იცვლება აგრეთვე მდგომარეობის ცვლილებისას, რადგან დამოკიდებულია ნივთიერებაში მოლეკულების განლაგების სიმჭიდროვეზე.

სითხეთა ნარევის სიმკვრივე ტოლია სითხეთა მასების ჯამის შეფარდებისა მთლიანი სითხის მოცულობასთან. ზოგადად, ნარევის მოცულობა შემადგენელი სითხეების მოცულობათა ჯამის ტოლი შეიძლება არ იყოს.

26. წნევა

ძალის რაიმე ზედაპირზე ზემოქმედების შედეგის დამახასიათებელ ფიზიკურ სიდიდეს წნევა ეწოდება.

წნევა არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც გამოითვლება საყრდენ ფართობზე მართობულად მოქმედი ძალის შეფარდებით ამ საყრდენის ფართობთან.

წნევა რიცხობრივად საყრდენი ფართობის ერთეულზე მართობულად მოქმედი ძალის ტოლია, აღინიშნება p – ასოთი და გამოითვლება ფორმულით:

$$p = \frac{F}{S},$$

სადაც F არის საყრდენ ზედაპირზე მართობულად მოქმედი ძალა (წნევის ძალა), ხოლო S – ამ საყრდენი ზედაპირის ფართობი. წნევა სკალარული სიდიდეა.

წნევის ძალა გამოითვლება ფორმულით:

$$F = pS.$$

წნევის ერთეულია 1 პასკალი (შემოკლებით 1 პა) $1 \text{ პა} = 1 \frac{\text{ნ}}{\text{მ}^2}$. პრაქტიკაში გამოიყენება წნევის სხვა ერთეულებიც:

1 ჰექტოპასკალი (1 ჰპა) = 100 პა , 1 კილოპასკალი (1 კპა) = 1000 პა .

ერთი და იმავე ძალის მოქმედებისას საყრდენი ფართობის გაზრდით წნევა მცირდება, ხოლო შემცირებით – იზრდება.

27. სითხის წნევა ჭურჭლის ფსკერსა და კედლებზე

● აირის წნევა

აირის მოლეკულები თავისუფლად მოძრაობენ. ამიტომ აირი ჭურჭელში მოთავსებისას, სითხეებისა და მყარი სხეულებისგან განსხვავებით, მთლიანად ავსებს ჭურჭლის მოცულობას.

აირის მოლეკულები განუწყვეტლივ და უწესრიგოდ (ქაოსურად) მოძრაობენ, ამიტომ უამრავი მოლეკულა ეჯახება ჭურჭლის ფსკერსა და კედლებს. ე. ი. მათზე მოქმედებს ძალით. სწორედ ეს განაპირობებს აირის წნევას ჭურჭელში. აირის წნევა ჭურჭლის ნებისმიერ წერტილში ერთნაირია.

როცა აირის მასა უცვლელია, მაშინ აირის მოცულობის შემცირებისას მისი წნევა იზრდება, ხოლო მოცულობის გაზრდისას – მცირდება. დახურულ ჭურჭელში ანუ მუდმივი მოცულობისას აირის წნევა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე. ტემპერატურის გაზრდით წნევა იზრდება.

● სითხის წნევა

სითხეებზე, ისევე, როგორც დედამიწაზე მოთავსებულ ყველა სხეულზე, მოქმედებს სიმძიმის ძალა. ამიტომ ჭურჭელში მოთავსებული სითხის ყოველი ფენა სიმძიმის ძალის მოქმედებით აწევა ქვედას. ძირითადად, სწორედ ამით არის გამოწვეული სითხის წნევა. ამიტომ სითხის სიღრმეში წნევა მეტია, ვიდრე ზედა ფენებში.

დაუშვათ, ჭურჭელში, რომლის ფუძის ფართობია S , ჩასხმულია წყალი h სიმაღლეზე (სურ. 39).

რადგან წყლის წნევა ჭურჭლის ფსკერსა და კედლებზე გამოწვეულია მასზე მოქმედი სიმძიმის ძალით, ამიტომ

$$p = \frac{F_{\text{სიმ}}}{S}, \text{ სადაც } F_{\text{სიმ}} = mg = \rho Vg.$$

ρ – წყლის სიმკვრივეა, ხოლო $V = Sh$ წყლის მოცულობაა.

$$p = \frac{\rho g V}{S} = \frac{\rho g h S}{S} = \rho g h,$$

ანუ სითხის წნევა ჭურჭლის ფსკერზე და კედლებზე გამოითვლება ფორმულით:

$$p = \rho g h.$$

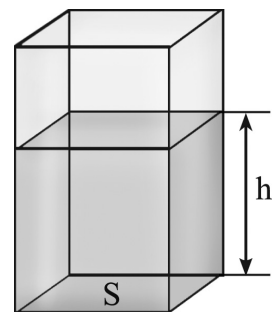
სითხის წნევა ჭურჭლის ფსკერზე და კედელზე დამოკიდებულია სითხის სიმკვრივესა და სვეტის სიმაღლეზე.

თუ სითხის ზედაპირზე მოქმედი წნევა არის p_0 (მაგალითად, ატმოსფერული წნევა) მაშინ:

$$p = p_0 + \rho g h.$$

სითხის წნევა ჭურჭლის კედელზე გამოითვლება ფორმულით:

$$p = \frac{\rho g h}{2}.$$



სურ. 39

28. პასკალის კანონი

მყარ სხეულზე გარე ძალით ზემოქმედებისას წნევა მხოლოდ ძალის მოქმედების მიმართულებით გადაეცემა. მაგალითად, თუ მარცხენა ხელისგულზე თხელ წიგნს მოათავსებ და მარჯვენა ხელის საჩვენებელი თითით დაწვები მას, მაშინ წნევას ხელის გულზე თითის გასწვრივ შეიგრძნობ.

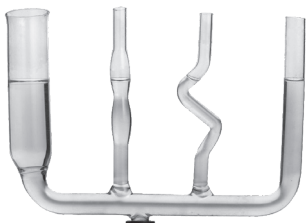
განსხვავებით მყარი სხეულებისაგან, სითხეებსა და აირებს აქვთ საერთო თვისება. მათ ფენებს შეუძლია ერთმანეთის მიმართ გადაადგილება. მაგალითად, თუ ჭიქაში წყალს ოდნავ შეუბერავ ჰაერს, იგი დაიწყებს მოძრაობას. ასევეა ჰაერიც. ჰაერის ფენების მოძრაობის შედეგად წარმოიშობა ქარი.

სითხისა და აირის ფენების ურთიერთმონაცვლეობა განაპირობებს სითხეებსა და აირებში წნევის გადაცემას ყველა მიმართულებით.

ეს კანონზომიერება დაადგინა ფრანგმა მეცნიერმა ბლეზ პასკალმა და მას **პასკალის კანონი ეწოდა**.

სითხესა და აირზე წარმოებული წნევა უცვლელად გადაეცემა სითხისა და აირის ყოველ წერტილს.

29. ზიარჭურჭელი



სურ. 40

საერთო სადინარის მქონე რამდენიმე ჭურჭელს **ზიარჭურჭელი** ეწოდება (სურ. 40).

დაუშვათ ზიარჭურჭლის ერთ მილში სითხის წნევაა $p_1 = \rho_1 g h_1$, მეორე მილში $p_2 = \rho_2 g h_2$. მაშინ სითხის წნევა პირველი და მეორე მილის ფსკერსა და მიმდებარე კედლებზე, პასკალის კანონის თანახმად, ერთმანეთის ტოლია: $p_1 = p_2$, ამიტომ, $\rho_1 g h_1 = \rho_2 g h_2$.

$$\text{აქედან გამომდინარე:} \quad \frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}.$$

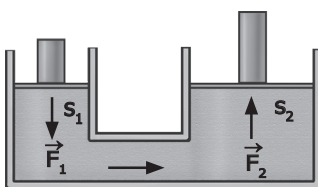
როცა $\rho_1 = \rho_2$, მაშინ $h_1 = h_2$, ხოლო როცა $\rho_1 \neq \rho_2$, მაშინ $h_1 \neq h_2$.

უძრავ ზიარჭურჭელში ერთგვაროვანი სითხის თავისუფალი ზედაპირი ერთ დონეზე დგას, ხოლო არაერთგვაროვანის – სხვადასხვაზე.

ის სითხე, რომლის სიმკვრივე ნაკლებია, მილში მეტ სიმაღლეზე დგება და პირიქით.

დედამიწაზე მსოფლიო ოკეანეში შემავალი წყლები, ზღვები და ოკეანეები ერთმანეთთან დაკავშირებული არიან სრუტეებით, ანუ ისინი ერთმანეთს სადინარით უკავშირდებიან. ამიტომ მსოფლიო ოკეანე უზარმაზარი ზიარჭურჭელია, რომლის ზედაპირზე წყლის დონე ყველგან ერთნაირია.

30. ჰიდრავლიკური მანქანა



სურ. 41

ჰიდრავლიკური მანქანა შედგება სხვადასხვა დიამეტრის ორი ცილინდრისაგან, რომლებიც ერთმანეთთან დაკავშირებულია საერთო სადინარით. ცილინდრებში ჩასხმულია ზეთი. პატარა ცილინდრის განივკვეთის ფართობია S_1 , ხოლო დიდისა S_2 (სურ. 41). თუ პატარა ცილინდრის დგუშზე ვიმოქმედებთ F_1 ძალით, მაშინ ამ ძალის მიერ წარმოებული წნევა იქნება:

$$p = \frac{F_1}{S_1}.$$

პასკალის კანონის თანახმად, ეს წნევა უცვლელად გადაეცემა დიდ დგუშს. ე. ი. დიდ დგუშზე წარმოებული წნევა იგივე იქნება რაც, პატარა ცილინდრის დგუშზე. ამ წნევის

მოქმედების გამო დიდ დგუშზე მოქმედი ძალა $F_2 = pS_2$. წნევის მნიშვნელობის გათვალისწინებით:

$$F_2 = \frac{F_1}{S_1} S_2 \quad \text{ანუ} \quad \frac{F_2}{F_1} = \frac{S_2}{S_1}.$$

რადგან $S_2 > S_1$, ამიტომ $F_2 > F_1$. ამგვარად, მცირე ძალით შეიძლება დიდი ტვირთის აწევა.

ჰიდრავლიკური მანქანა ძალაში მოგებას გვაძლევს იმდენჯერ, რამდენჯერაც დიდი დგუშის ფართობი მეტია მცირე დგუშის ფართობზე.

ჰიდრავლიკული მანქანა მარტივი მექანიზმია.

31. ატმოსფერული წნევა

ატმოსფერული წნევა XVII საუკუნეში გაზომა იტალიელმა მეცნიერმა ევანჯელისტა ტორიჩელიმ. მან ერთი მხრიდან დარჩილული 1 მეტრი სიგრძის მილი გაავსო ვერცხლისწყლით, მილის ღია ბოლოს მჭიდროდ დააჭირა თითი და გადმოაპირქვა ვერცხლისწყლიან ჯამში. თითის მოცილების შემდეგ ვერცხლისწყლის ნაწილი ჩაიღვარა ჯამში. მილში დარჩა 76 სმ სიმაღლის ვერცხლისწყლის სვეტი. ეს გამოიწვია იმან, რომ მილში ვერცხლისწყლის სვეტის წნევა გაუტოლდა ღია ჯამში ვერცხლისწყლის თავისუფალ ზედაპირზე მოქმედ ატმოსფერულ წნევას. მილში დარჩენილ ცარიელ სივრცეს **ტორიჩელის სიცარიელე** უწოდეს.

ატმოსფერული წნევა პრაქტიკაში შეიძლება გაიზომოს მინის მილში ვერცხლისწყლის სვეტის სიმაღლით (მილიმეტრობით). მაგალითად, თუ ატმოსფერული წნევა არის 760 მმ ვწყ. სვ, ეს ნიშნავს, რომ ჰაერი აწარმოებს ისეთივე წნევას, რამდენსაც 760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტი. თუ სხვადასხვა მიზეზით შემცირდა ან გაიზარდა ატმოსფერული წნევა, შესაბამისად დაიწევს ან აიწევს ვერცხლისწყლის სვეტის სიმაღლე მილში.

ატმოსფერული წნევის ერთეულია 1 მილიმეტრი ვერცხლისწყლის სვეტისა (1 მმ ვწყ. სვ.). ეს ერთეული პასკალებში იქნება

$$p = \rho g h = 9,8 \text{ ნ/კგ} \cdot 13\,600 \text{ კგ/მ}^3 \cdot 0,001 \text{ მ} = 133,3 \text{ პა}.$$

760 მმ ვერცხლისწყლის სვეტის წნევა 0°C -ზე მიჩნეულია ნორმალურ ატმოსფერულ წნევად, მას **1 ატმოსფეროს უწოდებენ** და აღნიშნავენ ასე: **1 ატმ.**

$$1 \text{ ატმ} = 760 \text{ მმ ვწყ. სვ.} = 101\,308 \text{ პა} \approx 100\,000 \text{ პა}.$$

დედამიწის ზედაპირთან ახლოს, ყოველ 12 მ სიმაღლეზე ასვლისას ატმოსფერული წნევა მცირდება ვერცხლისწყლის სვეტის 1მმ-ით ანუ ≈ 133 პა-ით.

რადგან ჰაერის სიმკვრივე სხვადასხვა სიმაღლეზე სხვადასხვაა ატმოსფერული წნევის გამოსათვლელად $p = \rho g h$ ფორმულის გამოყენება შეუძლებელია.

ამინდის ცვლილებისას ატმოსფერული წნევა იცვლება. თუ ატმოსფერული წნევა შემცირდება მოსალოდნელია წვიმა, ხოლო თუ მოიმატებს, მაშინ მშრალი ამინდი იქნება.

32. არქიმედეს კანონი

ექსპერიმენტებით დადგინდა, რომ სითხეში ჩაშვებულ სხეულზე მოქმედებს ამომგდები ძალა. ამ ძალის სიდიდე 22 საუკუნის წინ დაადგინა ბერძენმა მეცნიერმა არქიმედემ. მას **არქიმედეს ძალა** ეწოდა.

ცდის შედეგების ანალიზიდან გამომდინარეობს, რომ **სითხეში მოთავსებულ სხეულზე მოქმედი ამომგდები ძალის სიდიდე ამ სხეულის მიერ გამოდევნილი სითხის წონის ტოლია.**

$$F_{\text{ა}} = P_{\text{სითხ.}} \quad (1)$$

სითხის წონა:

$$P_{\text{სითხ}} = g m_{\text{სითხ}}. \quad (2)$$

სითხეში ჩაძირული სხეულის ან სხეულის ჩაძირული ნაწილის მიერ გამოდევნილი სითხის მოცულობა აღვნიშნოთ $V_{\text{სხ}}$ -ით. გამოდევნილი სითხის მოცულობა სხეულის ან სხეულის ჩაძირული ნაწილის მოცულობის ტოლია

$$V_{\text{სითხ}} = V_{\text{სხ}}.$$

ამიტომ, გამოდევნილი სითხის მასა:

$$m_{\text{სითხ}} = \rho_{\text{სითხ}} V_{\text{სხ}}. \quad (3)$$

თუ (2) და (3) ჩავსვამთ (1)-ში, მაშინ:

$$F_{\text{ა}} = \rho_{\text{სითხ}} g V_{\text{სხ}}.$$

არქიმედეს (ამომგდები) ძალა დამოკიდებულია სითხის სიმკვრივეზე, მასში ჩაძირული სხეულის მოცულობაზე და მიმართულია სიმძიმის ძალის საპირისპიროდ.

სხეულების წონა სითხეში ნაკლებია, ვიდრე ჰაერში. ეს ნიშნავს, რომ არქიმედეს ძალა სითხეში მოთავსებულ სხეულზე მოქმედებს ქვემოდან ზემოთ. ამომგდები ძალა ამსუბუქებს სხეულებს. ამომგდები ძალა მოქმედებს აირში მყოფ სხეულებზეც.

33. სხეულთა ცურვის პირობები

სხვადასხვა სხეული სითხეში სხვადასხვა მდებარეობას იკავებს. ზოგიერთი იძირება, ზოგიერთი ტივტივებს, ზოგიერთი კი ცურავს სითხის ნებისმიერ სიღრმეზე. ეს განპირობებულია იმით, თუ რა თანაფარდობაა არქიმედეს ძალასა და სხეულზე მოქმედ სიმძიმის ძალას შორის.

● თუ სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა მეტია არქიმედეს ძალაზე, მაშინ სხეული იწყებს მოძრაობას სითხის ფსკერისკენ და იძირება.

$$F_{\text{სიმ}} > F_{\text{ა}} \quad \text{ანუ} \quad \rho_{\text{სხ}} g V_{\text{სხ}} > \rho_{\text{სითხ}} g V_{\text{სხ}}. \quad \text{ე. ი.} \quad \rho_{\text{სხ}} > \rho_{\text{სითხ}}.$$

სხეული სითხეში იძირება, თუ მისი სიმკვრივე მეტია სითხის სიმკვრივეზე. სხეულის ფსკერზე ჩაძრვისას იგი ეყრდნობა ფსკერს და მასზე ამომგდები ძალა აღარ იმოქმედებს.

● თუ სხეულზე მოქმედი სიმძიმის ძალა ტოლია არქიმედეს ძალის, მაშინ სხეული წონასწორობაშია სითხის შიგნით ნებისმიერ ადგილას.

$$F_{\text{სიმ}} = F_{\text{ა}} \quad \text{ანუ} \quad \rho_{\text{სხ}} g V_{\text{სხ}} = \rho_{\text{სითხ}} g V_{\text{სხ}}. \quad \text{ე. ი.} \quad \rho_{\text{სხ}} = \rho_{\text{სითხ}}.$$

სხეული ცურავს სითხეში ნებისმიერ სიღრმეზე, თუ მათი სიმკვრივეები ტოლია.

● თუ სიმძიმის ძალა ნაკლებია არქიმედეს ძალაზე, მაშინ სხეული იწყებს სითხის ზედაპირისკენ მოძრაობას.

$$F_{\text{სიმ}} < F_{\text{ა}} \quad \text{ანუ} \quad \rho_{\text{სხ}} g V_{\text{სხ}} < \rho_{\text{სითხ}} g V_{\text{სხ}}. \quad \text{ე. ი.} \quad \rho_{\text{სხ}} < \rho_{\text{სითხ}}.$$

სხეული ამოტივტივდება წყლის ზედაპირზე, თუ მისი სიმკვრივე ნაკლებია სითხის სიმკვრივეზე.

როდესაც სითხეში მოთავსებული სხეული იწყებს სითხის ზედაპირიდან ამოტივტივებას, მასზე მოქმედი არქიმედეს ძალა იწყებს შემცირებას, რადგან მცირდება სხეულის მოცულობის ის ნაწილი, რომელიც სითხეშია ჩაძირული. ამ შემთხვევაში არქიმედეს ძალა ტოლია იმ სითხის წონისა, რომელიც გამოდევნა სხეულის სითხეში ჩაძირულმა ნაწილმა. როდესაც არქიმედეს ძალა გაუტოლდება სიმძიმის ძალას, სითხიდან ამოტივტივებული სხეული ცურავს სითხის ზედაპირზე. ამიტომ სხეულის ტივტივისას ამომგდები ძალა გამოითვლება ფორმულით:

$$F_{\text{ა}} = \rho_{\text{სითხ}} g V_{\text{სხ}}.$$

34. სხეულის იმპულსი

ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც სხეულის მასისა და სიჩქარის ნამრავლის ტოლია ეწოდება სხეულის იმპულსი.

იმპულსი ერთ-ერთი უმნიშვნელოვანესი ფიზიკური სიდიდეა. იგი ვექტორული სიდიდეა და აღინიშნება $\vec{p}$ ასოთი. მისი მიმართულება ემთხვევა სხეულის სიჩქარის მიმართულებას.

$$\vec{p} = m\vec{v}.$$

SI სისტემაში იმპულსის ერთეულია 1 კგმ/წმ.

რადგან სხეულის იმპულსი ვექტორული სიდიდეა, ჩვენ მიერ წინასწარ შერჩეული რომელიმე მიმართულების თანხვედრილი იმპულსის ნიშანი დადებითია, ხოლო მისი საწინააღმდეგო იმპულსი – უარყოფითი.

● ძალის იმპულსი

ნიუტონის II კანონის თანახმად სხეული სიჩქარეს იცვლის ძალის მოქმედების შედეგად. ამიტომ $\vec{F} = m\vec{a}$

თუ სხეულის საწყისი სიჩქარეა v_0 , საბოლოო v , ძალის მოქმედების დრო – t , მაშინ

$$\vec{F} = m \frac{\vec{v} - \vec{v}_0}{t} = \frac{m\vec{v} - m\vec{v}_0}{t},$$

$$\text{ე. ი. } \vec{F} \cdot t = m\vec{v} - m\vec{v}_0.$$

$$\text{რადგან } m\vec{v} = \vec{p}, \text{ ამიტომ } \vec{F} \cdot t = \vec{p} - \vec{p}_0 = \Delta\vec{p}.$$

$\vec{F} \cdot t$ სიდიდეს **ძალის იმპულსი** ეწოდება.

აქედან გამომდინარე, ძალის იმპულსი სხეულის იმპულსის ცვლილების ტოლია.

სხეულის იმპულსი ერთი და იმავე სიდიდით შეიძლება შეიცვალოს:

1. თუ სხეულზე ხანმოკლე დროში დიდი ძალა იმოქმედებს;
2. თუ ხანგრძლივი დროის განმავლობაში მცირე ძალა იმოქმედებს.

თუ ურთიერთქმედ სხვადასხვა მასის სხეულებზე ერთი და იმავე დროში ერთნაირი ძალა იმოქმედებს, მაშინ ამ სხეულთა იმპულსები ერთნაირი სიდიდით შეიცვლება.

35. იმპულსის მუდმივობის კანონი

ნიუტონის მესამე კანონის თანახმად ორი სხეული ერთმანეთზე მოქმედებს სიდიდით ტოლი და საწინააღმდეგოდ მიმართული ძალებით:

$$\vec{F}_1 = -\vec{F}_2. \quad (1)$$

ნიუტონის მეორე კანონის თანახმად,

$$\vec{F}_1 = m_1\vec{a}_1, \quad \vec{F}_2 = m_2\vec{a}_2, \quad \text{სადაც } m_1 \text{ და } m_2 \text{ სხეულთა მასებია.}$$

$$(1) \text{ ტოლობის თანახმად: } m_1\vec{a}_1 = -m_2\vec{a}_2, \quad \vec{a}_1 = \frac{\vec{v}'_1 - \vec{v}_1}{t}, \quad \vec{a}_2 = \frac{\vec{v}'_2 - \vec{v}_2}{t}.$$

$\vec{a}_1$ და $\vec{a}_2$ არის t დროის განმავლობაში სხეულის ურთიერთქმედების შედეგად შეძენილი აჩქარებები, $\vec{v}_1$ და $\vec{v}_2$ სხეულთა სიჩქარეებია დაჯახებამდე, ხოლო $\vec{v}'_1$ და $\vec{v}'_2$ სხეულთა სიჩქარეები დაჯახების შემდეგ.

$$\begin{aligned} \text{ამიტომ} \quad \vec{F}_1 &= m_1 \frac{\vec{v}_1' - \vec{v}_1}{t}, \quad \vec{F}_2 = m_2 \frac{\vec{v}_2' - \vec{v}_2}{t}, \\ \text{ხოლო} \quad \vec{F}_1 t &= m_1 (\vec{v}_1' - \vec{v}_1), \quad \vec{F}_2 t = m_2 (\vec{v}_2' - \vec{v}_2). \end{aligned}$$

(1) ფორმულის მიხედვით:

$$m_1 \frac{\vec{v}_1' - \vec{v}_1}{t} = - m_2 \frac{\vec{v}_2' - \vec{v}_2}{t} \text{ ანუ } m_1 (\vec{v}_1' - \vec{v}_1) = - m_2 (\vec{v}_2' - \vec{v}_2),$$

$$\text{აქედან,} \quad m_1 \vec{v}_1' + m_2 \vec{v}_2' = m_1 \vec{v}_1 + m_2 \vec{v}_2, \quad (2)$$

სადაც $\vec{p}_1 = m_1 \vec{v}_1$ და $\vec{p}_2 = m_2 \vec{v}_2$ სხეულების იმპულსებია დაჯახებამდე, ხოლო $\vec{p}_3 = m_1 \vec{v}_1'$ და $\vec{p}_4 = m_2 \vec{v}_2'$ – დაჯახების შემდეგ. ამ აღნიშვნების გათვალისწინებით (2) განტოლება ასე შეიძლება გადავწეროთ:

$$\vec{p}_1 + \vec{p}_2 = \vec{p}_3 + \vec{p}_4.$$

ანუ სხეულების იმპულსების ჯამი ურთიერთქმედებამდე ტოლია მათი იმპულსების ჯამისა ურთიერთქმედების შემდეგ. მიღებული შედეგი სამართლიანია, ე. ი. სრულდება **ჩაკეტილი სისტემისათვის**, ანუ სხეულთა ისეთი ჯგუფისათვის, რომლებიც ურთიერთქმედებენ მხოლოდ ერთმანეთთან. ისინი არ ურთიერთქმედებენ ისეთ სხეულებთან, რომლებიც ამ ჯგუფში (სისტემაში) არ შედის.

ამ დებულებას უწოდებენ **იმპულსის მუდმივობის კანონს** ჩაკეტილ სისტემაში ურთიერთქმედ ნებისმიერი სხეულებისათვის.

ჩაკეტილ სისტემაში სხეულების იმპულსების გეომეტრიული ჯამი ურთიერთქმედებამდე ტოლია ამავე სხეულების იმპულსების გეომეტრიული ჯამისა ურთიერთქმედების შემდეგ.

რადგან იმპულსების გეომეტრიული ჯამი ურთიერთქმედების შემდეგ არ იცვლება, სხეულების იმპულსების გეგმილების ალგებრული ჯამიც უცვლელი რჩება. ამიტომ გეომეტრიული შეკრება ალგებრული შეკრებით შეიძლება შეიცვალოს.

36. მექანიკური მუშაობა და სიმძლავრე

მექანიკური მუშაობა (A) არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ძალისა და ამ ძალის მიმართულებით სხეულის გადაადგილების ნამრავლის ტოლია:

$$A = Fs,$$

სადაც F არის ძალის სიდიდე, s სხეულის გადაადგილების მოდული მუშაობის შესრულების პროცესში სხეულზე მოქმედი მუდმივი ძალის მიმართულებით.

SI სისტემაში მუშაობის ერთეულია ჯოული (შემოკლებით – ჯ) ინგლისელი მეცნიერის ჯეიმს პრესკოტ ჯოულის პატივსაცემად.

$$1 \text{ ჯოული} = 1 \text{ ნიუტონი} \cdot 1 \text{ მეტრი} = 1 \text{ ნ} \cdot \text{მ}.$$

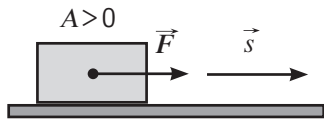
1 ჯოული მუშაობაა, რომელსაც ასრულებს 1 ნიუტონი ძალა ამ ძალის მოქმედების მიმართულებით სხეულის 1 მ მანძილზე გადასადგილებლად. მუშაობა სკალარული სიდიდეა.

იმისათვის, რომ სხეულმა მუშაობა შეასრულოს (სუღერითა, ეს სხეული ადამიანია თუ მანქანა) – მას მუშაობის შესრულების **უნარი** უნდა გააჩნდეს.

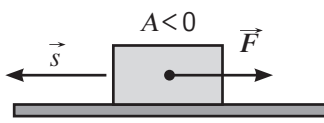
როდესაც სხეულს აქვს მუშაობის შესრულების უნარი, ამბობენ, რომ სხეულს აქვს ენერგია. რაიმე კონკრეტული მუშაობის შესრულებისას სხეულის ის ენერგია მცირდება, რომლის ხარჯზეც სრულდება ეს მუშაობა. შესრულებული **მუშაობა არის ერთი სახიდან სხვა სახეში გარდაქმნილი ენერგიის ზომა და სიდიდით ის ენერგიის ცვლილების ტოლია.**

მუშაობის სიდიდე დამოკიდებულია სხეულზე მოქმედ ძალასა და გადაადგილებას შორის კუთხეზე:

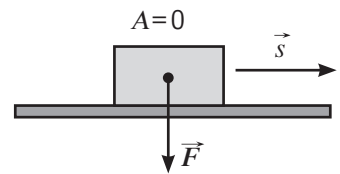
$$A = F \cdot s \cdot \cos \alpha.$$



თუ $\alpha = 0^\circ$, მაშინ $A = Fs$.



თუ $\alpha = 180^\circ$, მაშინ $A = -Fs$.



თუ $\alpha = 90^\circ$, მაშინ $A = 0$.

ე.ი. მუშაობა შეიძლება იყოს დადებითი, უარყოფითი ან ნულის ტოლი.

სხეულზე მოდებული ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა ნულის ტოლია: როდესაც სხეულზე ძალაა მოდებული და გადაადგილება არ სრულდება; თუ გადაადგილება სხეული და ამ მიმართულებით მასზე ძალა არ მოქმედებს; ასევე, თუ სხეულზე მოქმედი ძალა გადაადგილების მართობულია.

● სიმძიმის ძალის მუშაობა

თუ m მასის სხეული რაიმე h სიმაღლიდან ვარდება დედამიწაზე, მაშინ სიმძიმის ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა გამოითვლება ფორმულით:

$$A = F_g \cdot h = mgh.$$

თუ m მასის სხეული მოძრაობს ვერტიკალურად ზევით, მაშინ სიმძიმის ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა: $A = -mgh$, სადაც h არის სხეულის ასვლის სიმაღლე. აქედან გამომდინარე, შეკრულ წირზე სიმძიმის ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა 0-ის ტოლია.

$$A = -mgh + mgh = 0$$

● ღრეკადობის ძალის მუშაობა

ღრეკადობის ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა გამოითვლება ფორმულით:

$$A = \frac{kx^2}{2},$$

სადაც k არის სხეულის სიხისტე, x – სხეულის წაგრძელების სიდიდე.

● სიმძლავრე

მუშაობის შესრულების სისწრაფეს ახასიათებენ ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც უწოდებენ სიმძლავრეს.

ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც განისაზღვრება დროის რაიმე (t) შუალედში სხეულის მიერ შესრულებული მუშაობის (A) შეფარდებით დროის ამ შუალედთან, სიმძლავრე ეწოდება და აღინიშნება N ასოთი.

$$N = \frac{A}{t}.$$

SI სისტემაში სიმძლავრის ერთეულია **1 ვატი** (შემოკლებით **ვტ**). სიმძლავრის ერთეულს ვატი, ინგლისელი მეცნიერის და გამომგონებლის, ჯეიმს უატის პატივსაცემად ეწოდა. 1 ვატი არის ისეთი მექანიზმის სიმძლავრე, რომელიც ერთ წამში ერთ ჯოულ მუშაობას ასრულებს.

$$1 \text{ ვტ} = 1 \frac{\text{ჯ}}{\text{წმ}}$$

თანაბარი მოძრაობისას სიმძლავრე შეიძლება გამოისახოს წევის ძალისა და მოძრაობის სიჩქარის ნამრავლით:

$$N = \frac{A}{t} = \frac{Fs}{t} = Fv.$$

სიმძლავრის ერთეულად იყენებენ აგრეთვე „ცხენის ძალას“ (ცძ).

$$1 \text{ ცძ} = 735 \text{ ვტ.}$$

მექანიზმის მარგი ქმედების კოეფიციენტის გამოსათვლელად სასარგებლო სიმძლავრეს აფარდებენ მექანიზმის სრულ სიმძლავრესთან და ანგარიშობენ პროცენტებით:

$$N = \frac{N_{\text{სას}}}{N_{\text{სრ}}} \cdot 100\%.$$

$N_{\text{სას}}$ არის სასარგებლო სიმძლავრე, $N_{\text{სრ}}$ – სრული სიმძლავრე.

მარგი ქმედების კოეფიციენტი ყოველთვის ნაკლებია 100 %-ზე.

37. მექანიკური ენერგია

ენერგია არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ახასიათებს სხეულის მიერ მუშაობის შესრულების უნარს. მექანიკური ენერგიის რაოდენობრივი ცვლილება განსაზღვრავს სხეულის ერთი მდგომარეობიდან მეორეში გადასვლისას შესრულებულ მუშაობას.

● პოტენციური ენერგია

მექანიკური ენერგიის ერთ-ერთი სახეა **პოტენციური ენერგია.**

ენერგიას, რომელიც განისაზღვრება სხეულების ან სხეულის შემადგენელი ნაწილების ურთიერთმდებარეობით პოტენციური ენერგია ეწოდება.

დედამიწის ზედაპირიდან რაიმე სიმაღლეზე ატანილი სხეულის პოტენციური ენერგია დამოკიდებულია სხეულის მასაზე და დედამიწის ზედაპირიდან მის მდებარეობაზე. იგი გამოითვლება ფორმულით:

$$E_p = mgh.$$

ამ ენერგიას გრავიტაციულ პოტენციურ ენერგიასაც უწოდებენ. ვინაიდან ენერგიის ცვლილება სხეულზე მოქმედი ძალის მიერ შესრულებული მუშაობით განისაზღვრება, ამიტომ ენერგიის ერთეულიც არის **ჯოული**.

პოტენციური ენერგიის გამოთვლისას უნდა გავითვალისწინოთ ნულოვანი დონე, რომლის მიმართაც ვითვლით სხეულის პოტენციურ ენერგიას. თუ ნულოვან დონედ მივიჩნევთ დედამიწის ზედაპირს, მაშინ რაიმე h სიმაღლიდან m მასის სხეულის ვარდნისას შესრულებული მუშაობა ტოლი იქნება სხეულის პოტენციური ენერგიების სხვაობისა საწყის და საბოლოო მდგომარეობებს შორის. საწყის მდგომარეობაში სხეულის პოტენციური ენერგია არის $E_1 = mgh$, საბოლოო მდგომარეობაში $E_2 = 0$. ე. ი. შესრულებული მუშაობა

$$A = E_1 - E_2 = mgh.$$

რაიმე h სიმაღლიდან სხეულის ვარდნისას მისი პოტენციური ენერგია მცირდება, ხოლო იგივე სიმაღლეზე ჰორიზონტალური გადაადგილებისას სხეულის პოტენციური ენერგია არ იცვლება. სხეულის პოტენციური ენერგია, როდესაც მასზე სიმძიმის ძალა მოქმედებს, ამ სიმძიმის ძალის მიერ სხეულის ნულოვან დონეზე გადასაადგილებლად შესრულებული მუშაობის ტოლია.

ზოგადად, შესრულებული მუშაობა შეიძლება გამოისახოს საბოლოო და საწყისი პოტენციური ენერგიის სხვაობით ანუ პოტენციური ენერგიის ცვლილებით:

$$A = -(E_2 - E_1).$$

პოტენციური ენერგია გააჩნია ჰიდროელექტროსადგურის კაშხალში დაგუბებულ წყალს, შეკუმშულ აირსა და ორთქლს, დეფორმირებულ ზამბარას.

დრეკადად დეფორმირებული ზამბარის პოტენციური ენერგია დამოკიდებულია იმაზე, თუ რამდენად დიდი მანძილით არის დაშორებული ზამბარის ხეიბი საწყისი მდებარეობიდან. მისი პოტენციური ენერგია გამოითვლება ფორმულით:

$$E_3 = \frac{kx^2}{2},$$

სადაც k ზამბარის სიხისტეა, x – დეფორმაციის სიდიდე.

დეფორმაციისას დაგროვებული პოტენციური ენერგია გამოითვლება არადეფორმირებული ზამბარის საწყისი მდგომარეობის მიმართ, რომელიც მიჩნეულია ნულოვან დონედ.

● კინეტიკური ენერგია

ყოველ სხეულს მოძრაობისას გააჩნია ენერგია, ვინაიდან მას შეუძლია შეასრულოს მუშაობა. **მოძრავი სხეულის ენერგიას კინეტიკურ ენერგიას უწოდებენ.** რაც უფრო მეტია სხეულის მოძრაობის სიჩქარე და მასა მეტი კინეტიკური ენერგია აქვს სხეულს. კინეტიკური ენერგია გამოითვლება ფორმულით:

$$E_3 = \frac{mv^2}{2}.$$

სხეულის სიჩქარის შესაცვლელად საჭიროა შესრულდეს მუშაობა, რომელიც ამ სხეულის კინეტიკური ენერგიის ცვლილების ტოლია. შესაბამისად შესრულებული მუშაობა იქნება:

$$A = E_{32} - E_{31}$$

მოძრავი სხეულის კინეტიკური ენერგიის ცვლილება გვიჩვენებს რა სიდიდის მექანიკური მუშაობა უნდა შეასრულოს სხეულზე მოქმედმა ძალამ, რომ m მასის სხეულის სიჩქარე v_0 -დან v -მდე შეიცვალოს. შესაბამისად, შესრულებული მუშაობა საბოლოო და საწყისი კინეტიკური ენერგიების სხვაობის ტოლია.

$$A = \frac{mv^2}{2} - \frac{mv_0^2}{2} = \Delta E_{\text{კინ.}}$$

ამ დებულებას კინეტიკური ენერგიის თეორემას უწოდებენ.

38. ენერგიის მუდმივობის კანონი

სხეულის კინეტიკური და პოტენციური ენერგიების ჯამს სრული მექანიკური ენერგია ეწოდება.

$$E = E_{\text{კინ.}} + E_{\text{პოტ.}}$$

სხეულის სრული მექანიკური ენერგია, თუ მის მიერ ხახუნის ძალის დაძლევაზე არ სრულდება მუშაობა, მოცემული სხეულისათვის რჩება მუდმივი.

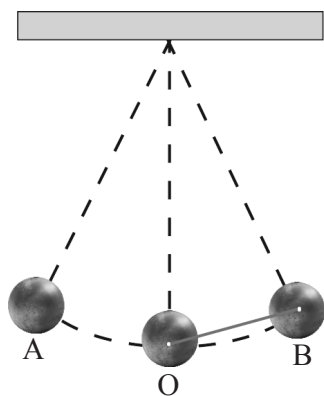
სხეულების რაიმე სიმაღლიდან დედამიწაზე ვარდნისას მათი პოტენციური ენერგია მცირდება, კინეტიკური ენერგია იზრდება, ხოლო სხეულის სრული მექანიკური ენერგია არ იცვლება – რჩება მუდმივი.

ეს წესი სამართლიანია როცა არ ხდება მექანიკური ენერგიის გარდაქმნა შინაგან ენერგიაში. ხახუნის ძალის მოქმედებისას სხეულის მექანიკური ენერგიის ნაწილი ამ სხეულის შინაგან ენერგიად გარდაიქმნება.

ზოგადად, **ენერგია არც წარმოიქმნება და არც ქრება. ის ერთი სახიდან სხვა სახის ენერგიად გარდაიქმნება ან ერთი სხეულიდან მეორეს გადაეცემა. ამ დებულებას ენერგიის მუდმივობის კანონი ეწოდება.**

ენერგიის მუდმივობის კანონი სამართლიანია ბუნების ყველა მოვლენისათვის.

39. ჰარმონიული რხევა



სურ. 42

რხევითი მოძრაობა მექანიკური მოძრაობის ერთ-ერთი სახეა. მოძრაობას, როდესაც სხეული წონასწორობის მდებარეობიდან ხან ერთ, ხან მეორე მხარეს გადაადგილდება, რხევითი მოძრაობა ეწოდება (სურ. 42).

მერხევი სხეულის წონასწორობის მდებარეობიდან უდიდეს გადახრას რხევის ამპლიტუდა ეწოდება.

42-ე სურათზე OB ამპლიტუდაა და მას A_m ასოთი აღნიშნავენ ($OB = A_m$). (სხეულის მცირე კუთხით გადახრისას ქორდის და რკალის სიგრძეები თითქმის ტოლია).

მერხევი სხეული ერთი სრული რხევის შესრულებისას ოთხი ამპლიტუდის ტოლ მანძილს გადის.

დროის შუალედს, რომლის განმავლობაშიც სრულდება ერთი სრული რხევა, რხევის პერიოდი ეწოდება.

რხევის პერიოდი აღინიშნება – T ასოთი.

პერიოდის ერთეული SI სისტემაში არის 1 წმ.

დროის ერთეულში შესრულებულ რხევათა რიცხვს რხევის სიხშირე ეწოდება.

$$\nu = \frac{N}{t},$$

სადაც N არის t დროში შესრულებული რხევათა რიცხვი.

რხევის პერიოდი და სიხშირე ურთიერთმეზრუნებული სიდიდეებია

$$T = \frac{t}{N}, \quad \nu = \frac{1}{T}.$$

რხევის სიხშირის ერთეული არის ჰერცი. **1 ჰერცი** ისეთი რხევის სიხშირეა, როდესაც სხეული 1 წმ-ში ერთ სრულ რხევას ასრულებს.

რხევითი მოძრაობა მერხევ სისტემაში (მაგ., ძაფი და მასზე დაკიდებული სხეული) აღიძვრება შინაგანი ან გარეგანი ძალის მოქმედებით. რხევას, რომელიც მხოლოდ შინაგანი ძალებით წარმოებს თავისუფალი რხევა ეწოდება. თავისუფალი რხევა ყოველთვის მიღწევადია. თუ დავაკვირდებით მერხევი სხეულის კოორდინატის ცვლილებას დროის მიხედვით აღმოჩნდება, რომ მას სინუსოიდის ან კოსინუსოიდის სახე აქვს.

რხევა, რომლის კოორდინატის დროზე დამოკიდებულება გამოისახება სინუსის ან კოსინუსის საშუალებით, ჰარმონიული რხევა ეწოდება.

$$x = A_m \cos(\omega t + \varphi_0),$$

სადაც x – არის სხეულის წანაცვლება წონასწორობის მდგომარეობიდან, A_m – რხევის ამპლიტუდა, ω – ციკლური სიხშირე, (რხევათა რიცხვი 2π წამში), t – დრო.

$\varphi = \omega t + \varphi_0$ – რხევის ფაზაა.

როცა $t = 0$, $\varphi = \varphi_0$. φ_0 -ს უწოდებენ საწყის ფაზას.

რადგან
$$\omega = \frac{2\pi}{T},$$

ამიტომ:
$$x = A_m \cos \left(\frac{2\pi}{T} \cdot t + \varphi_0 \right).$$

40. მათემატიკური ქანქარა. ზამბარიანი ქანქარა

მათემატიკური ქანქარა ეწოდება უჭიმად და უწონად ძაფზე დაკიდებულ ნივთიერ (მატერიალურ) წერტილს.

მათემატიკური ქანქარა ბუნებაში არ არსებობს. მისი მოდელია ხისტი, უწონო ძაფზე დაკიდებული m მასის ბურთულა, რომლის ზომა ძაფის სიგრძესთან შედარებით შეიძლება უგულებელვყოთ (სურ. 43). ასეთ პირობებში ვგულისხმობთ, რომ მერხვეი სისტემის მთელი მასა ბურთულის ცენტრშია თავმოყრილი.

მათემატიკური ქანქარის რხევის პერიოდის გამოსათვლელი ფორმულაა:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}.$$

სადაც l არის ქანქარის სიგრძე, g თავისუფალი ვარდნის აჩქარება.

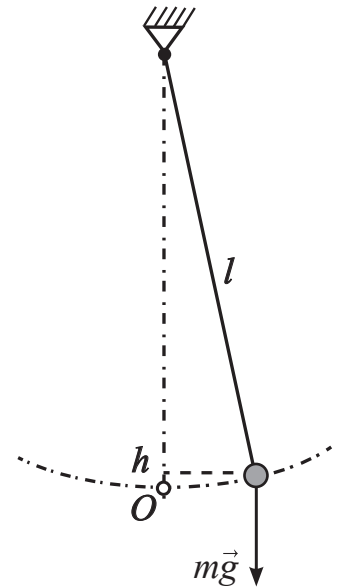
ფორმულა სამართლიანია ქანქარის მცირე კუთხით გადახრისას. მათემატიკური ქანქარის რხევის პერიოდი მცირე კუთხით გადახრისას არ არის დამოკიდებული რხევის ამპლიტუდაზე. მათემატიკური ქანქარის რხევა შინაგანი ძალითაა გამოწვეული. ამ შემთხვევაში შინაგანი ძალა არის ძაფის დაჭიმულობის ძალისა და სიმძიმის ძალის ტოლქმედი.

ზამბარაზე დამაგრებულ სხეულს **ზამბარიანი** ქანქარა ეწოდება (სურ. 44). მათემატიკური ქანქარის ანალოგიურად ზამბარაზე დამაგრებული სხეულის რხევის პერიოდი:

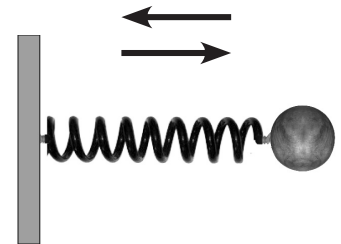
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}},$$

სადაც k არის ზამბარის სიხისტე, m – ზამბარაზე დამაგრებული ტვირთის მასა.

სხეულის რხევა განპირობებულია ზამბარის შიგნით აღძრული დრეკადობის ძალის მოქმედებით, ანუ შინაგანი ძალის მოქმედებით.



სურ. 43



სურ. 44

41. ენერგიის გარდაქმნა რხევითი მოძრაობისას

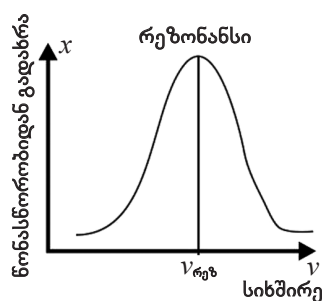
თუ ძაფზე დაკიდებულ ბურთულას წონასწორობის მდგომარეობიდან გამოვიყვანთ და გავუშვებთ ხელს, ის დაიწყებს რხევას ერთხელ მინიჭებული ენერგიის ხარჯზე ანუ თავისუფალ რხევას. თავისუფალი რხევა მიღევადი რხევაა. სხეულის თავისუფალი რხევის სიხშირე არის სხეულის რხევის **საკუთარი სიხშირე**.

მერხვეი სხეულის სიჩქარე ტრაექტორიის სხვადასხვა წერტილში სხვადასხვაა. კერძოდ, წონასწორობის მდგომარეობის გავლისას მისი სიჩქარე მაქსიმალურია, ხოლო კიდურა A და B წერტილებში (პარაგრაფი 39, სურ. 42) ნულის ტოლია. შესაბამისად, მერხვეი სხეულის მექანიკური ენერგია მუდმივად იცვლება, პოტენციური ენერგია $W_3 = \frac{kA_m^2}{2}$ გარდაიქმნება კინეტიკურში $W_3 = \frac{mv^2}{2}$ და პირიქით.

A და B წერტილებში პოტენციური ენერგია მაქსიმალურია, კინეტიკური $W_k = 0$. ხოლო O წერტილში კინეტიკური ენერგიაა მაქსიმალური, პოტენციური კი $W_{პოტ} = 0$. ამიტომ რხევითი მოძრაობისას $W_{სრ} = \frac{kA_m^2}{2}$.

მერხვე სხეულზე ხახუნის ძალის მოქმედებისას ენერგიის ნაწილი იხარჯება წინააღმდეგობის ძალის დაძლევაზე და ამიტომ პოტენციური ენერგია სრულად აღარ გარდაიქმნება კინეტიკურში და პირიქით. შედეგად, რხევა თანდათან მიიღევა და გარკვეული დროის შემდეგ სხეული ჩერდება.

42. იძულებითი რხევა. რეზონანსი



სურ. 45

პრაქტიკაში განსაკუთრებული მნიშვნელობა აქვს არამილევად რხევებს. არამილევადი რხევები წარმოებს მერხვე სისტემაზე გარე პერიოდული ძალის მოქმედებით.

რხევას, რომელიც წარმოებს გარე პერიოდული ძალის მოქმედებით, იძულებითი რხევა ეწოდება.

თუ გარე ძალის მუშაობა დადებითია, მაშინ მერხვეი სისტემა ღებულობს დამატებით ენერგიას და რხევა ძლიერდება (ამპლიტუდა იზრდება). როცა მუშაობა უარყოფითია, მაშინ პირიქით, რხევა მუხრუჭდება და იგი შეწყდება. თუ საქანელას უწესრიგოდ უბიძგებენ სხვადასხვა მიმართულებით, საქანელის გაქანება შეუძლებელი იქნება. დადებითი მუშაობა

სრულდება მაშინ, როცა ძალა გადაადგილების მიმართულებით მოქმედებს. თუ საქანელას გარე პერიოდული ძალა უბიძგებს მისი მოძრაობის მიმართულებით, საქანელის გაქანება გაძლიერდება. თითოეული რიტმული, პერიოდული ბიძგის დროს საქანელის ენერგიის დანაკარგი ხახუნის დაძლევაზე შეივსება. მრავალი ბიძგისას მინიჭებული ენერგია იკრიბება და რხევის ამპლიტუდა მკვეთრად იზრდება (სურ. 45).

იძულებით რხევის ამპლიტუდის მკვეთრი ზრდის მოვლენას, როცა რხევის მაიძულებელი ძალის ცვლილების სიხშირე ემთხვევა სხეულის რხევის საკუთარ სიხშირეს, რეზონანსი ეწოდება.

43. მექანიკური ტალღები

გარემოში მექანიკური რხევების გავრცელებისას წარმოიქმნება ტალღა.

რხევის გავრცელებას გარემოში ტალღა ეწოდება.

ტალღის წარმოსაქმნელად აუცილებელია არსებობდეს მერხვეი სხეული (რხევის წყარო) და დრეკადი გარემო. დრეკადი გარემოს (სითხეები, აირები და მყარი სხეულები) შემადგენელი ნაწილაკები ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ დრეკადობის ძალებით. მერხვეი ნაწილაკი ურთიერთქმედებს მის მეზობელ ნაწილაკთან და აიძულებს მას დაიწყოს რხევა. რხევითი მოძრაობა თანდათან გადაეცემა ყველა ნაწილაკს და იგი ვრცელდება მთელ გარემოში. სწორედ ამით არის გამოწვეული ტალღების წარმოშობა წყალში, ზონარში, ზამბარაში და ა. შ.

ტალღის გავრცელებისას არ ხდება ნივთიერების გადატანა – **ტალღას მხოლოდ ენერგია გადააქვს**. დროის ერთეულში ერთეული განივკვეთის ფართობში ტალღის მიერ გადატანილი ენერგია ტალღაში რხევის ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულია და ტალღის **ინტენსივობა** ეწოდება. $I \sim A_m^2$.

მანძილს, რომელზედაც ტალღა ნაწილაკის რხევის ერთი პერიოდის განმავლობაში ვრცელდება, **ტალღის სიგრძე** ეწოდება და აღინიშნება λ (ლამბდა) ასოთი.

ტალღა გარემოში განსაზღვრული სიჩქარით ვრცელდება. პერიოდის ტოლ დროში ტალღა ტალღის სიგრძის ტოლ მანძილზე ვრცელდება. ამიტომ, **ტალღის სიჩქარე** ტოლია ტალღის სიგრძის შეფარდებისა რხევის პერიოდთან.

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

აქედან,

$$v = \lambda \cdot \nu.$$

სხვადასხვა ბუნების ტალღა სხვადასხვა სიჩქარით ვრცელდება. ტალღის სიჩქარე დამოკიდებულია აგრეთვე იმ გარემოს ფიზიკურ თვისებებზე, რომელშიც ის ვრცელდება.

44. განივი და გრძივი ტალღები

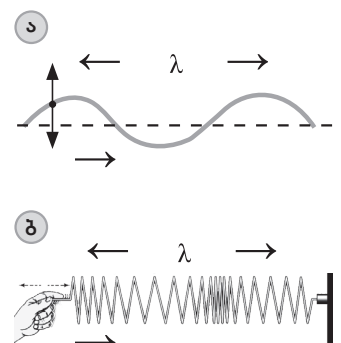
მექანიკური ტალღები ძირითადად ორი სახისაა: განივი და გრძივი.

ტალღას, რომელშიც ნაწილაკების რხევის მიმართულება ტალღის გავრცელების მიმართულების მართობულია, **განივი ტალღა** ეწოდება (სურ. 46 ა).

ტალღას, რომელიც ვრცელდება ნაწილაკების რხევის მიმართულებით, **გრძივი ტალღა** ეწოდება (სურ. 46 ბ).

განივი ტალღისათვის ტალღის სიგრძე არის მანძილი ორ უახლოეს თხემს (ან ღრმულს) შორის. ხოლო გრძივი ტალღისათვის ტალღის სიგრძეა მანძილი ორ უახლოეს შესქელებას (ან შეთხელებას) შორის.

განივი ტალღა ვრცელდება მყარ გარემოში და თხევადი გარემოს ზედაპირზე. გრძივი ტალღა ვრცელდება მყარ, თხევად და აირად გარემოში. ტალღების გავრცელება დამოკიდებულია იმაზე, თუ როგორ შეუძლიათ ნივთიერების შემადგენელ ნაწილაკებს გაავრცელონ მასში აღძრული რხევები.



სურ. 46

45. ბგერითი ტალღა

ბგერა – გარემოს ნაწილაკების რხევითი მოძრაობაა, რომელიც ვრცელდება გრძივი მექანიკური ტალღების სახით. ბგერა ვრცელდება აირად, თხევად და მყარ მდგომარეობაში მყოფ გარემოში. ბგერა არ ვრცელდება ვაკუუმში. ბგერის სიხშირე იცვლება 16 ჰც-დან 20000 ჰც-მდე დიაპაზონში. ადამიანი ამ დიაპაზონის სიხშირის რხევებს ბგერად აღიქვამს. ბგერით დიაპაზონის სიხშირეებზე უფრო დიდი ან მცირე სიხშირის რხევები-სადმი ადამიანის ყური მგრძნობიარე არ არის. 20000 ჰც-ზე უფრო მაღალი სიხშირე **ულტრაბგერების** დიაპაზონს განეკუთვნება. 16 ჰც-ზე მცირე სიხშირე განეკუთვნება **ინფრაბგერების** დიაპაზონს.

ბგერის **ხმამაღლობა** დამოკიდებულია ამპლიტუდაზე. ბგერის **ხმამაღლობა** ბგერით ტალღაში რხევის ამპლიტუდის კვადრატის პროპორციულად იზრდება.

ადამიანის ყური ყველა სიხშირის ბგერისადმი თანაბრად მგრძნობიარე არ არის, ერთი და იმავე ინტენსივობის პირობებში ადამიანის სმენის მაქსიმალური მგრძნობიარობა აქვს 1-4 კჰც სიხშირის ბგერებისადმი, ხოლო ძალიან დაბალი სიხშირის ბგერებისადმი სმენითი მგრძნობიარობა ორჯერ და უფრო მეტად ნაკლებია.

ბგერის სიმაღლე ანუ ტონალობა დამოკიდებულია რხევის სიხშირეზე. ბგერის სიმაღლე ყოველთვის შესაბამისობაშია რხევების გარკვეულ სიხშირესთან. **რაც უფრო მეტია რხევის სიხშირე, მით უფრო მაღალია ბგერის ტონალობა.**

ბგერა მოცემულ გარემოში გარკვეული სიჩქარით ვრცელდება, რასაც **ბგერის სიჩქარე** ეწოდება.

სხვადასხვა გარემოში ბგერის გავრცელების სიჩქარე სხვადასხვაა. მაგალითად: ჰაერში, ოთახის ტემპერატურაზე (20°C) ბგერის სიჩქარე არის 343 მ/წმ (1230 კმ/სთ). სუფთა წყალში 20°C ტემპერატურაზე ბგერის სიჩქარეა 1482 მ/წმ (5335 კმ/სთ). ხოლო ნაწრთობ ფოლადში ბგერის სიჩქარე ფოლადის ხარისხის მიხედვით აღწევს 5960 მ/წმ სიჩქარეს (21460 კმ/სთ). ერთი გარემოდან მეორეში გადასვლისას ტალღის სიხშირე არ იცვლება, იცვლება ტალღის სიგრძე და ტალღის სიჩქარე.

თუ ბგერის ამრეკლი კედელი, ან სხვა წინააღმდეგობა, ბგერის გავრცელების გზაზე ისე შორსაა მოთავსებული, რომ იმპულსურად ბგერის წარმოქმნიდან არეკლილი ბგერის უკან დაბრუნებამდე უფრო დიდი დრო გადის, ვიდრე 0,1 წმ-ია, მაშინ ადამიანი ბგერის წყაროდან გავრცელებულ ბგერას და არეკლილ ბგერას ერთმანეთისაგან გამოყოფილად აღიქვამს. ამ მოვლენას გამოძახილი ანუ **ექო** ეწოდება. ექოს წარმოქმნის ბგერის გავრცელების გზაზე ბგერის ამრეკლი დაბრკოლება, თუ ის ბგერის წყაროდან 17 მეტრზე უფრო შორსაა მოთავსებული. ბგერას აირეკლავს ისეთი დაბრკოლება, რომელიც ბგერებს არ შთანთქავს და რომლის ზომა ბგერიითი ტალღის სიგრძეზე მეტია. მანძილი დაბრკოლებამდე გამოითვლება ფორმულით:

$$s = \frac{vt}{2},$$

სადაც v ბგერის სიჩქარეა, t — დრო, რომლის განმავლობაში ბგერა იქით და აქეთ მანძილის გავლას ანდომებს.

46. სინათლის გავრცელება ერთგვაროვან გარემოში

სინათლე ვრცელდება სინათლის წყაროებიდან. სინათლის წყაროები შეიძლება იყოს **ბუნებრივი და ხელოვნური**. ბუნებრივი სინათლის წყაროა: მზე, ვარსკვლავები, ციციანათელა. ხელოვნურია: ნათურა, სანთელი, კოცონი და სხვ. სინათლის წყაროდან სინათლე სხივებით ვრცელდება. სინათლის სხივი არის წირი რომლის გასწვრივ ვრცელდება სინათლე. სინათლეს გადააქვს ენერგია.

სინათლის წყაროს უნოდებენ წერტილოვანს, თუ მისი ზომები შეიძლება უგულებელვყოთ ობიექტამდე მანძილთან შედარებით. მაგალითად, ნებისმიერი ვარსკვლავი დედამიწასთან შედარებით ათეულ ათასჯერ მეტი ზომის მიუხედავად, შეიძლება მივიჩნიოთ წერტილოვან წყაროდ, რადგან მანძილი, რომელზეც მის გამოსხივებას ვიხილავთ, გაცილებით მეტია ვარსკვლავის ზომაზე.

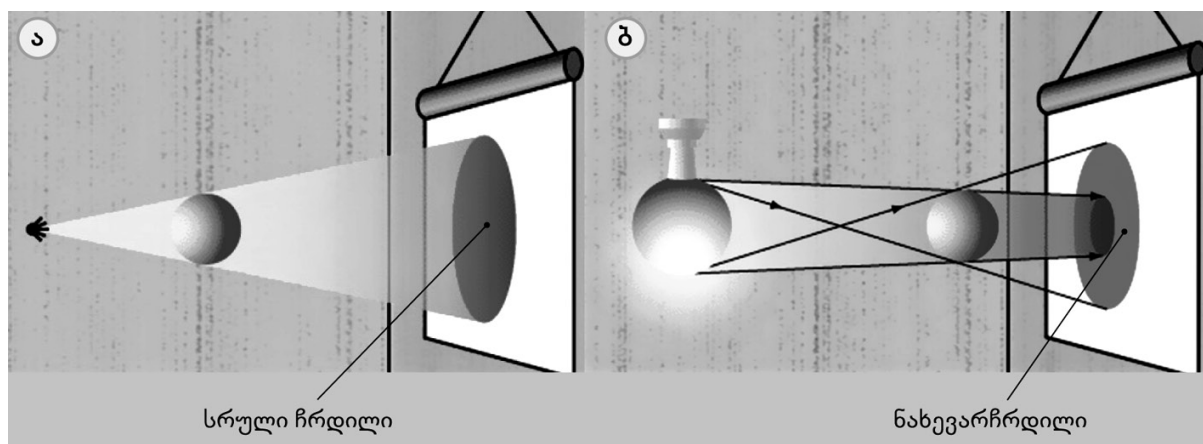
სინათლე **ერთგვაროვან გარემოში წრფივად ვრცელდება**.

სინათლე ვაკუუმში **300 000 კმ/წმ სიჩქარით** ვრცელდება. ეს ყველაზე დიდი შესაძლო სიჩქარეა. ჰაერსა და სხვა ნივთიერებებში სინათლის სიჩქარე ნაკლებია მის სიჩქარეზე ვაკუუმში.

ზოგიერთი სხეული სინათლეს ატარებს, ზოგიერთი კი – არა. სხეულებს, რომლებიც სინათლეს ატარებს, **გამჭვირვალე** სხეულებს უწოდებენ.

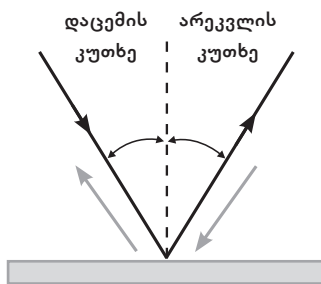
არაგამჭვირვალე სხეულის მიღმა სინათლე ვერ აღწევს და სინათლის წრფივი გავრცელების გამო ჩრდილი წარმოიქმნება.

სხეულთან შედარებით გაცილებით მცირე ზომის სინათლის წყარო (სინათლის წერტილოვანი წყარო) სხეულის მიღმა მუქ ჩრდილს წარმოქმნის, რომელსაც მკაცრად გამოყოფილი საზღვრები აქვს (სურ. 47 ა). სხვაგვარად ასეთ ჩრდილს **სრულ ჩრდილს** უწოდებენ. სხეულთან შედარებით დიდი ზომის სინათლის წყარო სხეულის მიღმა (უკან) მუქთან ერთად, მკრთალ ჩრდილსაც წარმოქმნის. ასეთ ჩრდილს **ნახევარჩრდილი ეწოდება** (სურ. 47 ბ).



სურ. 47

47. სინათლის არეკვლა



სურ. 48

სინათლე რაიმე სხეულის ზედაპირზე დაცემისას „უკუიგდება“, როგორც რაიმე წინააღმდეგობიდან ანუ – აირეკლება. არეკლილი სხივი იგივე გარემოში ვრცელდება, რომელშიც დაეცა სხივი.

კუთხეს დაცემულ სხივსა და დაცემის წერტილში აღმართულ მართობს შორის **დაცემის კუთხე** ეწოდება (სურ. 48).

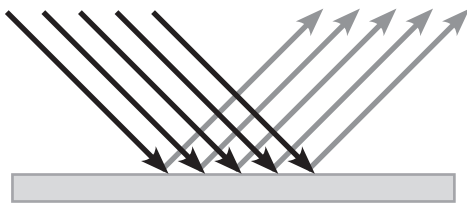
კუთხეს არეკლილ სხივსა და სხივის დაცემის წერტილში აღმართულ მართობს შორის **არეკვლის კუთხე** ეწოდება.

ექსპერიმენტებით დადგინდა სინათლის არეკვლის კანონები: **სინათლის დაცემის კუთხე არეკვლის კუთხის ტოლია**

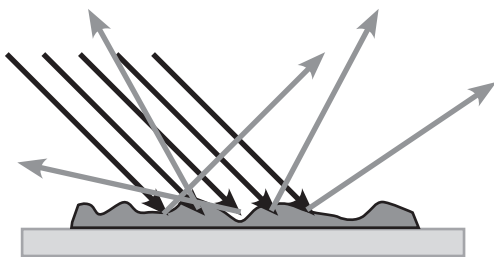
$$\alpha = \beta;$$

დაცემული სხივი, არეკლილი სხივი და დაცემის წერტილში აღმართული მართობი ერთ სიბრტყეში მდებარეობენ;

დაცემული და არეკლილი სხივები ურთიერთშეკვევადია.



სურ. 49

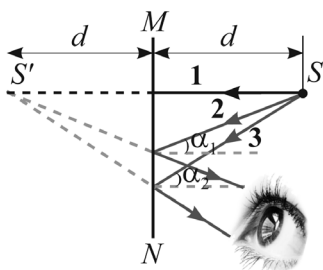


სურ. 50

ზედაპირი, რომელიც მასზე დაცემულ პარალელური სხივების კონას პარალელურად ირეკლავს არის სარკული ზედაპირი (სურ. 49). სარკულია კარგად გაპრიალებული, გლუვი ზედაპირები. თუ ზედაპირი პარალელურად დაცემულ სხივებს გაბნეულად, სხვადასხვა მიმართულებით ირეკლავს (სურ. 50), მაშინ ასეთი არეკვლა არის დიფუზური და ზედაპირსაც დიფუზურს უწოდებენ. მქისე, არაგლუვი ზედაპირები სინათლეს დიფუზურად ირეკლავენ. მაგ., ქაღალდის ზედაპირი სხივებს დიფუზურად ირეკლავს.

სხეულის დანახვა მხოლოდ არეკლილი სხივებით შეიძლება. თუ სხეული მასზე დაცემულ სინათლეს არ ირეკლავს, მაშინ მისი დანახვა შეუძლებელია.

48. გამოსახულების აგება ბრტყელ სარკეში



სურ. 51

ბრტყელ სარკეში საგნის გამოსახულების მიღება სინათლის სხივების არეკვლის კანონით აიხსნება.

დავუშვათ S მნათი სხეული (სურ. 51) ბრტყელი სარკიდან (MN) დაშორებულია d მანძილით.

S მნათი წერტილიდან სინათლე ყველა მიმართულებით გამოსხივდება. ამ სხივებიდან ავირჩიოთ სამი: ერთი სარკის მართობული (1) და ორი – რაიმე კუთხით დაცემული (2) და (3).

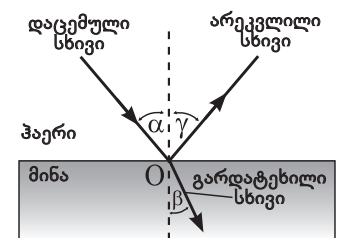
არეკვლის კანონის თანახმად, თუ დაცემის კუთხე 0° -ის ტოლია, მაშინ არეკვლის კუთხეც 0° -ია. ე. ი. სარკის მართობული სხივი (1) საწინააღმდეგო მიმართულებით აირეკლება. სხივი 2 და სხივი 3 შესაბამისი α_1 და α_2 დაცემის კუთხის ტოლი კუთხით აირეკლება. არეკლილი სხივები განშლადია, ამიტომ თვალი მნათი N წერტილის გამოსახულებას დაინახავს სარკის უკან (d მანძილზე) არეკვლილი სხივების გაგრძელების გადაკვეთაზე – N' წერტილში. ასეთ გამოსახულებას **წარმოსახვითი გამოსახულება** ეწოდება.

ბრტყელ სარკეში საგნის გამოსახულება წარმოსახვითია, საგნის ზომისაა და სარკიდან იგივე მანძილზეა, რა მანძილზეც საგანია დაშორებული სარკიდან. ე. ი. გამოსახულება საგნის სიმეტრიულია, მაგრამ არა იგივეური. მაგალითად, სარკეში მარჯვენა ხელის გამოსახულება აღიქმება, როგორც მარცხენა ხელი.

49. სინათლის გარდატეხა. გარდატეხის მაჩვენებელი

თუ გამჭვირვალე სხეულის ზედაპირს ეცემა სინათლე, მაშინ მისი ნაწილი აირეკლება, ნაწილი შთაინთქმება, ნაწილი კი ვრცელდება ამ გამჭვირვალე გარემოში და იცვლის მიმართულებას, ე. ი. გარდატყდება.

სინათლის სხივის გავრცელების მიმართულების ცვლილებას, როდესაც ის ერთი გამჭვირვალე გარემოდან მეორეში გადადის, **სინათლის გარდატეხა** ეწოდება. კუთხეს გარდატეხილ სხივსა და ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირზე სხივის დაცემის წერტილში აღმართულ მართობს შორის **გარდატეხის კუთხე** ეწოდება (სურ. 52).



სურ. 52

სინათლის გარდატეხა გარკვეულ კანონზომიერებებს ემორჩილება.

გამოთვლებით დადგინდა, რომ დაცემის კუთხის სინუსის შეფარდება გარდატეხის კუთხის სინუსთან მუდმივი სიდიდეა. მაგალითად, ჰაერიდან წყალში გადასვლისას სხივის სხვადასხვა კუთხით დაცემისას მიიღება, რომ:

$$\frac{\sin 30^\circ}{\sin 23^\circ} = \frac{\sin 45^\circ}{\sin 33^\circ} = \frac{\sin 60^\circ}{\sin 42^\circ} \cong 1,3.$$

ნებისმიერი ორი გარემოსათვის ეს თანაფარდობა ასე ჩაიწერება:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_{21}.$$

სადაც α დაცემის კუთხეა, γ გარდატეხის კუთხე, ხოლო n_{21} მუდმივი სიდიდეა. მას უწოდებენ მეორე **გარემოს გარდატეხის ფარდობით მაჩვენებელს** პირველის მიმართ. ერთი გარემოს სინათლის გარდატეხის მაჩვენებელი მეორე გარემოს მიმართ განისაზღვრება ამ გარემოებში სინათლის სიჩქარეთა შეფარდებით:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2},$$

სადაც v_1 არის სინათლის სიჩქარე ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივ გარემოში, ხოლო v_2 – ოპტიკურად მეტად მკვრივ გარემოში.

გარემოს, რომელშიც სინათლის სიჩქარე მეტია, ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივ გარემოს უწოდებენ, მაგალითად: ჰაერი ოპტიკურად ნაკლებად მკვრივია ვიდრე მინა. თუ სინათლის სხივი ჰაერიდან მინაში გადადის, მაშინ დაცემის კუთხე გარდატეხის კუთხეზე მეტია, ხოლო მინიდან ჰაერში გადასვლისას კი – პირიქით. დაცემის კუთხე ნაკლებია გარდატეხის კუთხეზე. ორი გარემოს გამყოფ ზედაპირზე მართობულად დაცემული სხივი მეორე გარემოში გავრცელებისას არ გარდატყდება, არ იცვლის მიმართულებას. სხვადასხვა ნივთიერება სინათლის სხივს სხვადასხვანაირად გარდატეხს.

1621 წელს ჰოლანდიელმა მეცნიერმა ვილბრორდ სნელიუსმა ჩამოაყალიბა სინათლის გარდატეხის კანონი ჰაერიდან წყალში სხივის გადასვლისათვის, რომელიც სამართლიანია ნებისმიერი ორი გარემოსათვის.

დაცემული სხივი, გარდატეხილი სხივი და ორი გარემოს გამყოფი ზედაპირისადმი სხივის დაცემის წერტილში გავლებული მართობი ერთ სიბრტყეში მდებარეობს.

დაცემის კუთხის სინუსის შეფარდება გარდატეხის კუთხის სინუსთან მუდმივი სიდიდეა.

როდესაც ერთ-ერთი გარემო ჰაერია ან ვაკუუმი, ხოლო მეორე – რაიმე სხვა გარემო (მინა, წყალი, სხვა გამჭვირვალე ნივთიერება), მაშინ n -ს ამ გარემოს (მინის, წყლის და სხვ.) **გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი** ეწოდება.

$$n = \frac{c}{v}.$$

სადაც c სინათლის სიჩქარეა ვაკუუმში, ხოლო v – სინათლის სიჩქარე ამ გარემოში.

გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებელი გვიჩვენებს რამდენჯერ ნაკლებია მოცემულ გარემოში სინათლის სიჩქარე ვაკუუმში ან ჰაერში სინათლის სიჩქარესთან შედარებით. ვაკუუმის $n = 1$, ჰაერისთვის $n \approx 1$; მინისთვის – $1,4 \div 1,6$.

თუ n_1 და n_2 პირველი და მეორე გარემოს გარდატეხის აბსოლუტური მაჩვენებლებია, მაშინ მეორე გარემოს გარდატეხის ფარდობითი მაჩვენებელი პირველის მიმართ იქნება:

$$n_{21} = \frac{n_2}{n_1}.$$

ვიცით, რომ $n_1 = \frac{c}{v_1}$, $n_2 = \frac{c}{v_2}$, მაშინ მეორე გარემოს გარდატეხის ფარდობითი მაჩვენებელი პირველის მიმართ იქნება:

$$n_{21} = \frac{v_1}{v_2} \quad \text{ანუ} \quad \frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}.$$

50. სინათლის დისპერსია

თეთრი სინათლე რთული სინათლეა. იგი ერთმანეთისაგან განსხვავებული სიგრძისა და სიხშირის მქონე ელექტრომაგნიტური ტალღების ერთობლიობაა. პრიზმაში თეთრი სინათლის გასვლის შემდეგ იგი ფერად კონებად იშლება. თეთრი სინათლის დაშლას ფერად კონებად **დისპერსიას** უწოდებენ. სხვადასხვა ფერის სინათლე ერთი გარემოდან მეორე გარემოში გადასვლისას სხვადასხვა კუთხით გარდატეხება. გარემოს გარდატეხის მაჩვენებლის სინათლის ტალღის სიგრძეზე დამოკიდებულების შედეგად მიიღება სინათლის დისპერსია. დისპერსიის შედეგად მიღებულ ფერთა განლაგებას **სპექტრს** უწოდებენ. ცისარტყელა სინათლის დისპერსიის თვალსაჩინო მაგალითია. იგი წარმოიქმნება წვიმის შემდეგ მზის სხივების წყლის წვეთებში გარდატეხის შედეგად. სინათლის დისპერსიისას თეთრი ფერის სინათლე იშლება: **წითელ, წარინჯისფერ, ყვითელ, მწვანე, ცისფერ, ლურჯ და იისფერ ფერებად**. თითოეული ფერის სინათლე მარტივი სინათლეა, რადგან ისინი სხვა სინათლეს არ შეიცავენ. მათში ყველაზე დიდი სიჩქარე აქვს წითელ სინათლეს, ყველაზე ნაკლები – იისფერს.

მინის პრიზმაში გავლისას ყველაზე დიდი კუთხით გარდატეხება იისფერი სხივები. ყველაზე ნაკლები კუთხით — წითელი. სპექტრის ყველა ფერის შეკრებით მიიღება თეთრი სინათლე, ხოლო სხვადასხვა ფერების შერევით სხვადასხვა ფერის სინათლე. მაგალითად: ლურჯი და მწვანე ფერების შერევით მიიღება ცისფერი, მწვანისა და წითელის შერევით — ყვითელი. წითელი, მწვანე და ლურჯი ფერების შერევით მიიღება თეთრი ფერი, ხოლო წყვილ-წყვილად შერევით – სპექტრის თითქმის ყველა ფერი. წითელ, მწვანე და ლურჯ ფერებს სპექტრის ძირითად ფერებს უწოდებენ.

51. ლინზები

მრუდე ზედაპირით შემოსაზღვრულ გამჭვირვალე სხეულს ლინზა ეწოდება. ლინზა შეიძლება იყოს მასზე დაცემული სხივების **შემკრები ან გამბნევი**.

ლინზას, რომლის შუა ნაწილი უფრო განიერია, ვიდრე კიდურა ნაწილები, **ამოზნექილი ლინზა** ეწოდება. ყველა **ამოზნექილი ლინზა შემკრებია** (სურ. 53).

ლინზას, რომლის შუა ნაწილი უფრო ვიწროა, ვიდრე კიდურა ნაწილები, **ჩაზნექილი ლინზა** ეწოდება. ყველა **ჩაზნექილი ლინზა გამბნევი** (სურ. 54).

წრფეს, რომელიც გადის ლინზის შემოსაზღვრელი სფერული ზედაპირების ცენტრებზე, ლინზის **მთავარი ოპტიკური ღერძი** ეწოდება. ლინზის **O ოპტიკურ ცენტრში** გამავალი სხივი არ გარდატყდება.

წერტილი, რომელშიც გარდატეხის შემდეგ იკრიბება შემკრებ ლინზაზე დაცემული მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივთა კონა, არის **შემკრები ლინზის ფოკუსი**, რომელიც აღინიშნება F ასოთი. ლინზის ფოკუსი მდებარეობს მთავარ ოპტიკურ ღერძზე (სურ. 53). F წერტილზე გამავალ ოპტიკური ღერძის მართობულ სიბრტყეს **ფოკალური სიბრტყე** ეწოდება.

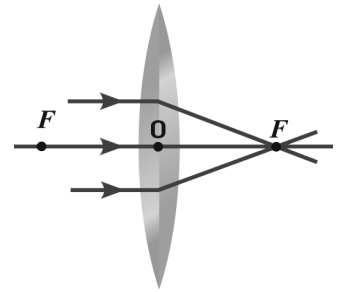
მანძილს ლინზიდან მის ფოკუსამდე **ფოკუსური მანძილი** ეწოდება და მასაც F ასოთი აღნიშნავენ. ლინზის ფოკუსური მანძილის შებრუნებულ სიდიდეს ლინზის **ოპტიკური ძალა** ეწოდება და აღინიშნება D ასოთი.

$$D = \frac{1}{F}$$

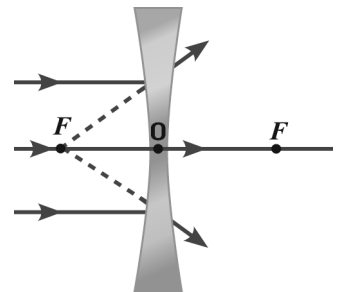
ოპტიკური ძალის ერთეულია 1 მ^{-1} და მას **დიოპტრი** (დპტრ.) ეწოდება. 1 დიოპტრი ისეთი ლინზის ოპტიკური ძალაა, რომლის ფოკუსური მანძილი 1 მ-ია.

შემკრები ლინზის ოპტიკური ძალა დადებითია ($D > 0$).

გამბნევი ლინზაზე დაცემული მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივები გარდატეხის შემდეგ არ იკრიბება. იკრიბება მხოლოდ გარდატეხილი სხივების გაგრძელებები. ისინი იკრიბება F წერტილში, რომელიც გამბნევი ლინზის მთავარ ოპტიკურ ღერძზე მდებარეობს. ეს წერტილი წარმოსახვითია და არის **გამბნევი ლინზის ფოკუსი** (სურ. 54). გამბნევი ლინზის ოპტიკური ძალა უარყოფითია ($D < 0$).



სურ. 53

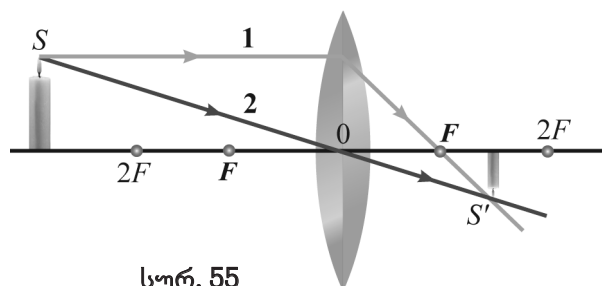


სურ. 54

52. გამოსახულების აგება ლინზაში

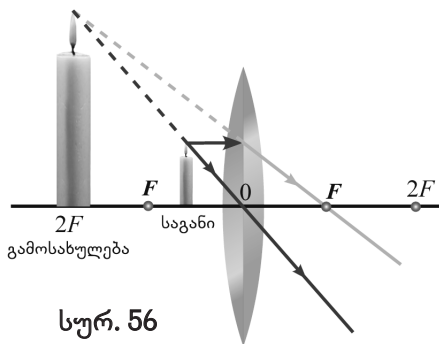
● გამოსახულების აგება შიშვარვ ლინზაში

შემკრებ ლინზაში გამოსახულების აგება შესაძლებელია ორი სხივის გამოყენებით. სხივით (1), რომელიც მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელურია და სხივით (2), რომელიც ლინზის **O** ცენტრში გადის (სურ. 55). ეს სხივები ლინზაში გასვლის შემდეგ გადაიკვეთება S' წერტილში, რომელიც სანთლის S წერტილის გამოსახულებაა. სანთლის ასეთი მდებარეობისას ($d > 2F$) მიიღება საგნის (სანთლის) შებრუნებული, შემცირებული და ნამდვილი გამოსახულება.



სურ. 55

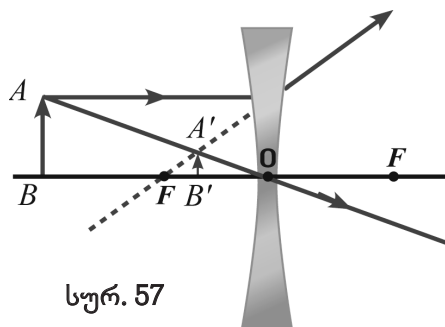
საგნის ლინზასთან დაახლოებისას გამოსახულება ლინზას შორდება და გამოსახუ-



სურ. 56

ლების ზომა იზრდება. ხოლო როდესაც საგანი მოთავსებულია ლინზასა და ფოკუსს შორის ($d < F$), მაშინ საგნის ნებისმიერი წერტილიდან გამოსული სხივი ლინზაში გავლის შემდეგ უკვე აღარ შეიკრება – მიიღება განშლადი სხივთა კონა. ამ შემთხვევაში გამოსახულება ეკრანზე აღარ მიიღება, რადგან განშლადი სხივები არ გადაიკვეთება. გადაიკვეთება მხოლოდ მათი გაგრძელებები. მიღებული გამოსახულება იქნება წარმოსახვითი, პირდაპირი და გადიდებული (სურ. 56).

● გამოსახულების აგება გამბნევ ლინზაში

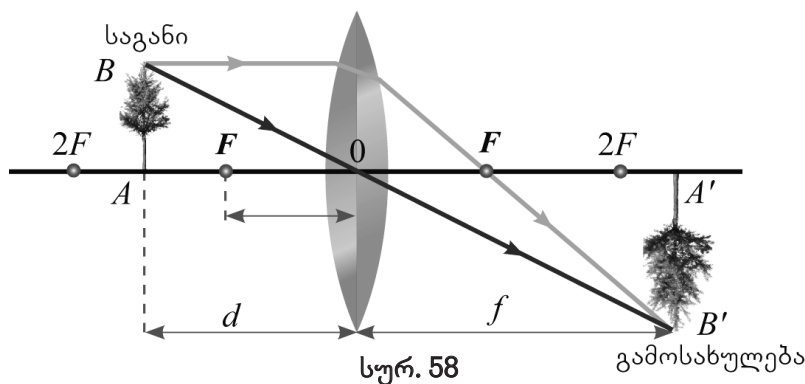


სურ. 57

გამბნევ ლინზაში AB საგნის $A'B'$ გამოსახულება ყოველთვის წარმოსახვითია, პირდაპირი და შემცირებული (სურ. 57).

გამოსახულება ნამდვილია, თუ სხივთა კონა ოპტიკურ სისტემაში გავლის შემდეგ უშუალოდ გადაიკვეთება რაიმე წერტილში. ხოლო წარმოსახვითია, თუ ის მიიღება არა ოპტიკურ სისტემაში გასული სხივების, არამედ ამ სხივების გაგრძელებათა გადაკვეთით.

53. თხელი ლინზის ფორმულა



სურ. 58

ლინზას, რომლის სისქე გაცილებით ნაკლებია ლინზის გრძივ ზომაზე, თხელი ლინზა ეწოდება.

თხელ ლინზაზე ჩატარებული ცდების შედეგად დადგინდა, რომ გამოსახულების ზომა და მდებარეობა დამოკიდებულია საგნისა და ლინზის ურთიერთგანლაგებაზე (სურ. 58).

არსებობს განსაზღვრული დამოკიდებულება სამ ფიზიკურ სიდიდეს: F , d და f შორის, სახელდობრ, ორმხრივ-ამოზნექილი ლინზისათვის ეს დამოკიდებულება გამოისახება ასე:

$$\frac{1}{F} = \frac{1}{d} + \frac{1}{f}; \quad \text{ორმხრივჩაზნექილი ლინზისათვის} \quad -\frac{1}{F} = \frac{1}{d} - \frac{1}{f},$$

სადაც F – ლინზის ფოკუსური მანძილია, d – მანძილი საგანსა და ლინზას შორის, ხოლო f – მანძილი ლინზასა და გამოსახულებას შორის. ფორმულა სამართლიანია თხელი ლინზისათვის. ამ ფორმულებს თხელი ლინზის ფორმულებს უწოდებენ.

გამოსახულების ზომის $A'B'$ შეფარდებას საგნის AB ზომასთან ლინზის გამაღიდებლობა ეწოდება.

$$\Gamma = \frac{A'B'}{AB}. \quad \text{ან} \quad \Gamma = \frac{f}{d}.$$

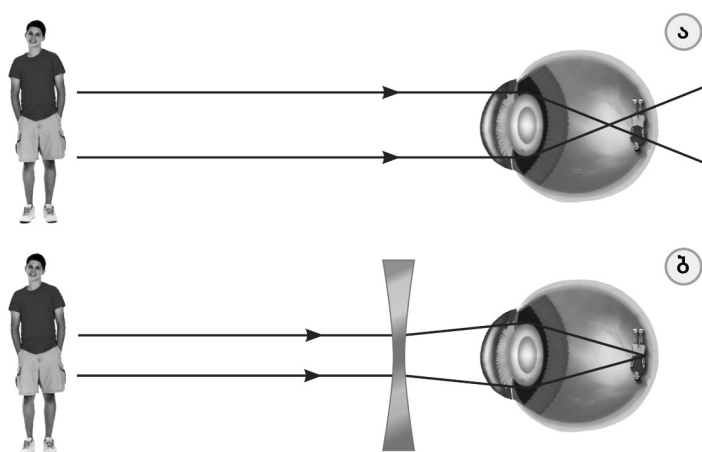
54. თვალი, როგორც ოპტიკური სისტემა

თვალიდან საგნამდე მინიმალურ მანძილს, რომელზეც საგანი მკაფიოდ ჩანს (თვალის ზედმეტი დაძაბვის გარეშე), **საუკეთესო ხედვის მანძილი** ეწოდება. ნორმალური მხედველობისათვის ის დაახლოებით 25 სმ-ია.

თვალში მთავარი ოპტიკური ღერძის პარალელური სხივები ბადურის ერთ წერტილში იკრიბება.

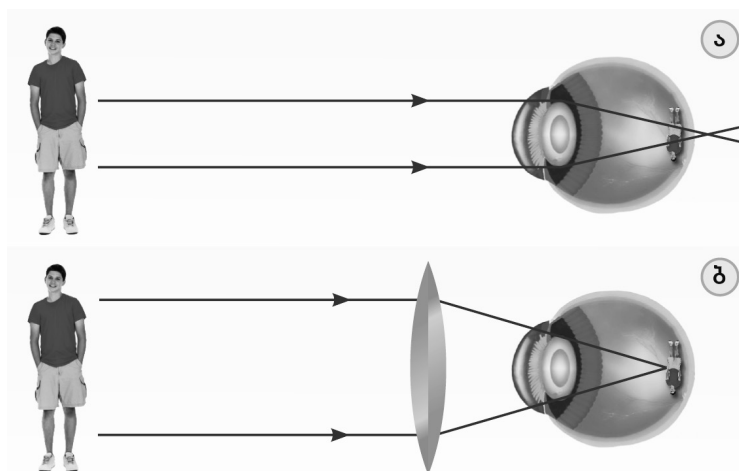
ყველა ადამიანს არა აქვს ნორმალური მხედველობა.

თუ თვალის ბროლიდან გამოსული სხივები ბადურის ნაცვლად მის წინ იკრიბება (სურ. 59 ა), მაშინ ადამიანი მისგან დაშორებულ საგნებს მკაფიოდ ვერ ხედავს. მხედველობის ამ ნაკლოვანებას ახლომხედველობა ჰქვია. ასეთ შემთხვევაში იყენებენ სათვალეს გამბნევი ლინზებით, რომლის ოპტიკური ძალა უარყოფითია. გამბნეველი ლინზებიანი სათვალე დაცემულ სხივებს განაბნევს და შედეგად საგნის გამოსახულება ბადურაზე გადაინაცვლებს (სურ. 59 ბ).



სურ. 59

ბროლის გარდამტეხი თვისების შემცირებისას თვალის ფოკუსი ბადურის უკანაა (სურ. 60 ა), რის გამოც ადამიანი ცუდად ხედავს ახლო საგნებს, თუმცა შორს საკმაოდ კარგად ხედავს, თვალის ასეთ ნაკლოვანებას შორსმხედველობას უწოდებენ. ამ ნაკლოვანების გამოსწორება ხდება შემკრებლინზიანი სათვალით, რომლის ოპტიკური ძალა დადებითია. ასეთი სათვალის გამოყენებით საგნის გამოსახულება ბადურაზე მიიღება (სურ. 60 ბ).



სურ. 60

55. ნივთიერების აგებულება

სხეულების თვისებები დამოკიდებულია იმ ნივთიერებებზე, რომლისგანაც ის შედგება. ნივთიერების თვისებების დახასიათება შესაძლებელია მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის საფუძველზე. მოლეკულურ - კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებებია:

- ყველა ნივთიერება შედგება ნაწილაკებისაგან – მოლეკულების, ატომების და იონებისაგან, რომლებიც კიდევ უფრო მცირე ელემენტარულ ნაწილაკებს შეიცავენ;
- ატომები, მოლეკულები და იონები განუწყვეტლივ ქაოსურად მოძრაობენ;
- ნებისმიერი სხეულის ნაწილაკებს შორის მოქმედებს მიზიდვისა და განზიდვის ძალები.

თითოეული დებულება ემყარება ცდის მონაცემებს ან შეიძლება ითქვას, მტკიცდება ექსპერიმენტულად. ნივთიერების ატომები და მოლეკულები ელექტრულად ნეიტრალური ნაწილაკებია მიუხედავად იმისა, რომ ისინი შეიცავენ დამუხტულ ნაწილაკებს. ნეიტრალურ ატომებსა და მოლეკულებში დადებითად და უარყოფითად დამუხტული ნაწილაკები ტოლი რაოდენობითაა და ისინი ანეიტრალეზენ ერთმანეთს. თუ ატომში რაიმე მიზეზის გამო ელექტრონების რაოდენობა მოიმატებს ან მოიკლებს, მაშინ მიიღება იონები. შესაბამისად ისინი ან უარყოფითი ან დადებითი იონები იქნებიან. ატომები შეერთებისას წარმოქმნიან მოლეკულებს, რომლებსაც ამ ნივთიერების დამახასიათებელი ქიმიური თვისებები აქვთ.

- ატომის ზომა განისაზღვრება მანძილით ბირთვის ცენტრიდან გარე სავალენტო ორბიტამდე.
- ნივთიერების დამახასიათებელია აგრეთვე ფიზიკური სიდიდე: **ნივთიერების რაოდენობა**, რომელიც გამოითვლება ნივთიერების შემადგენელი სტრუქტურული ელემენტების: მოლეკულების, ატომების ან იონების რიცხვით.

სხეულის შემადგენელ ნივთიერებაში მოლეკულების რაოდენობის დასათვლელად შემოღებულია სპეციალური საზომი ერთეული – 1 მოლი.

1 მოლი ნივთიერება შეიცავს C_{12} -ის იზოტოპის 12 გრამს. მოლებში გამოსახული ν – ნივთიერების რაოდენობა ტოლია მოცემულ ნივთიერებაში შემავალი N – მოლეკულების რიცხვის შეფარდებისა ერთ მოლ ნივთიერებაში შემავალ N_A (ავოგადროს რიცხვი) მოლეკულების რაოდენობასთან.

$$\nu = \frac{N}{N_A} \text{ მოლი,}$$

სადაც $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ მოლი}^{-1}$ არის ატომების რიცხვი 12 გ ნახშირბადში.

SI სისტემაში ნივთიერების რაოდენობის ერთეულია 1 მოლი.

ნივთიერების მოლური მასა M დაკავშირებულია ერთი მოლეკულის m_0 მასასთან ფორმულით: $M = m_0 N_A$.

სხეულში მოლებით გამოსახული ნივთიერების რაოდენობა

$$\nu = \frac{m}{M},$$

სადაც m ნივთიერების მასაა, M ამ ნივთიერების მოლური მასა.

მოლეკულების რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$N = \nu N_A = \frac{m}{M} N_A.$$

56. ბროუნის მოძრაობა

ბროუნის მოძრაობას უწოდებენ სითხეში ან ჰაერში შეტივტივებული ნაწილაკების განუწყვეტელ ქაოსურ მოძრაობას.

მრავალწლიანი გამოკვლევების შედეგად მეცნიერებმა დაასკვნეს, რომ შეტივტივებული ნაწილაკების ასეთი მოძრაობა გამოწვეულია სითხის შემადგენელი მოლეკულების ქაოსური მოძრაობის გამო შეტივტივებულ ნაწილაკთან ყოველი მხრიდან მათი დაჯახებისა და მასზე იმპულსის გადაცემის გამო. შეტივტივებულ ნაწილაკებს **ბროუნის ნაწილაკებს** უწოდებენ. ბროუნის ნაწილაკები ასეთი დაჯახებების შედეგად თვითონაც ქაოსურად მოძრაობენ. მოლეკულებისა და ატომების განუწყვეტელ ქაოსურ მოძრაობას **სითხურ მოძრაობას** უწოდებენ.

57. დიფუზია

მოლეკულურ-კინეტიკური თეორიის ძირითადი დებულებების თანახმად ნივთიერება შედგება ატომებისა და მოლეკულების ძალიან დიდი რიცხვისაგან, მაგრამ ისინი უწყვეტად კი არ არიან განლაგებული ერთმანეთთან, არამედ მათ შორის არის ცარიელი სივრცეები. ამიტომ როცა ორი სხვადასხვა ნივთიერება უშუალოდ ეხება ერთმანეთს, უმრავლეს შემთხვევაში ერთი ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები შედიან მეორე ნივთიერების შემადგენელ ნაწილაკებს შორის არსებულ სივრცეში და პირიქით. მაგალითად, წყალი ფერადდება მასში საღებავის მოთავსებისას. ეს ფაქტი ადასტურებს, რომ ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკები განუწყვეტლივ და ქაოსურად მოძრაობენ.

ნივთიერებების შემადგენელი ნაწილაკების ურთიერთშერევის მოვლენას დიფუზია ეწოდება.

დიფუზია მიმდინარეობს როგორც აირად, ისე მყარ და თხევად ნივთიერებებში. ცდებმა და დაკვირვებებმა აჩვენა, რომ დიფუზიის სიჩქარე დამოკიდებულია ტემპერატურაზე, აგრეგატულ მდგომარეობაზე და თვით ნივთიერების გვარობაზე. დიფუზიის სიჩქარის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე ადასტურებს, რომ დიფუზია ნაწილაკების მოძრაობის შედეგია.

58. მოლეკულების ურთიერთქმედება

ნებისმიერი ნივთიერების მოლეკულებს შორის ერთდროულად მოქმედებს მიზიდვისა და განზიდვის ძალები (მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალები). მყარი და თხევადი სხეულების არსებობა დაკავშირებულია მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალებთან. ეს ძალები რომ არ არსებობდნენ არც მყარი და არც თხევადი სხეულები იარსებებდნენ. ის ფაქტი, რომ მყარი და თხევადი სხეულების შეკუმშვა ძნელია, გამოწვეულია მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების არსებობით. თუ ნივთიერების ორი მოლეკულა დაშორდება ერთმანეთს მანძილზე, რომელიც აღემატება მათ შორის არსებულ მანძილს წონასწორობის მდგომარეობაში, მაშინ აღიძვრება ურთიერთმიზიდვის ძალა და დააბრუნებს მათ წონასწორობულ მდგომარეობაში. თუ ისინი ერთმანეთს დაუახლოვდებიან ისეთ მანძილზე, რომელიც ნაკლებია წონასწორობის მდგომარეობაში მათ შორის მანძილზე, მაშინ აღიძვრება ურთიერთგანზიდვის ძალა, რომელიც ისევ დააბრუნებს მათ წონასწორობის მდგომარეობაში. ამიტომ **მყარი და თხევადი სხეულების მოცულობის შეცვლა ძნელია.**

59. აირადი, თხევადი და მყარი აგრეგატული მდგომარეობები

ნივთიერებები შეიძლება იყვნენ სხვადასხვა მდგომარეობაში. მაგ.: **აირად, თხევად და მყარ მდგომარეობაში. ეს ნივთიერების აგრეგატული მდგომარეობებია.** მოლეკულების სითბური მოძრაობის ხასიათი და მათ შორის ურთიერთქმედება დამოკიდებულია ნივთიერების აგრეგატულ მდგომარეობაზე.

აირში მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედების ძალას არ შეუძლია მათი შეკავება ერთმანეთთან ძალიან ახლოს. ამიტომ ისინი იფანტებიან სხვადასხვა მხარეს და მთლიანად იკავებენ იმ მოცულობას, რომელშიც ისინი იმყოფებიან. **აირებს არა აქვთ გარკვეული ფორმა და მოცულობა.** ისინი ადვილად იკუმშებიან გარეშე ზემოქმედების შედეგად.

მყარ მდგომარეობაში ნივთიერებებს აქვთ გარკვეული ფორმა და მოცულობა. ისინი ძნელად იცვლიან მას. ეს გამოწვეულია მოლეკულებს შორის ძლიერი ურთიერთქმედების ძალების მოქმედებით. მოლეკულები მყარ სხეულში თავიანთი წონასწორული მდებარეობის მახლობლად განუწყვეტლივ ირხევიან, მაგრამ არ წყდებიან ამ წონასწორული მდებარეობიდან, არ გადაინაცვლებენ, თუ მათზე რაიმე ზემოქმედებას არ აწარმოებს გარეშე ძალა. მყარ მდგომარეობაში ნივთიერების უმრავლესობის მოლეკულები განლაგებული არიან პერიოდულად და ქმნიან გარკვეული კონფიგურაციის სივრცულ მესერს. ასეთი მესერები ქმნიან ე. წ. „**შორ წესრიგს**“, ანუ მოლეკულების მოწესრიგებული განლაგება მეორდება ასეული, ათასეული და რამოდენიმე ათასი უჯრედის შემდეგაც. მათ **კრისტალური** მყარი სხეულები ეწოდება. მყარ სხეულებს, რომლებშიც მოლეკულები ასეთი წესრიგით არ არიან განლაგებული, **ამორფულ სხეულებს** უწოდებენ. ამორფულ სხეულებში მოლეკულები ქმნიან „**ახლო წესრიგს**“.

სითხეს აქვს გარკვეული მოცულობა, მაგრამ **ფორმას ვერ ინარჩუნებს.** სითხეები იმ ჭურჭლის ფორმას იღებენ, რომელშიც არიან მოთავსებული. სითხის მოლეკულები „**ახლო წესრიგით**“ არიან განლაგებული. მეზობლად მყოფი მოლეკულები ერთმანეთთან ურთიერთქმედებენ გარკვეული დროის განმავლობაში. დროის ამ შუალედს „**ბინადარი დრო**“ ეწოდება. მოლეკულები ქაოსურად ირხევიან გარკვეული წონასწორული მდებარეობის მახლობლად ბინადარი დროის განმავლობაში, შემდეგ ისინი გადაინაცვლებენ მეზობელი მოლეკულების ადგილას. მეზობელი მოლეკულები ადგილებს უცვლიან ერთმანეთს. ამიტომ სითხეებს ახასიათებთ **დენადობა**, ისინი არ ეწინააღმდეგებიან ფორმის ცვლილებას, თუმცა მათი შეკუმშვა ძნელია. ამიტომ **სითხეები ინარჩუნებენ მოცულობას.**

მყარ მდგომარეობაში ნივთიერების თვისებები ყველა მიმართულებით ერთნაირი არ არის, ე. ი. **ანიზოტროპულია.** თხევად მდგომარეობაში მათი თვისებები ყველა მიმართულებით ერთნაირია. სითხეები **იზოტროპულია.**

60. ტემპერატურა. აბსოლუტური ტემპერატურა

● ტემპერატურა

ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკების ქაოსური მოძრაობა ანუ **სითბური მოძრაობა** განაპირობებს სხეულის ტემპერატურას.

რაც უფრო ინტენსიურია ნაწილაკების ქაოსური მოძრაობა, მით მეტია სხეულის ტემპერატურა. **ტემპერატურა სხეულის ან სხეულთა სისტემის სითბური წონასწორობის მდგომარეობის მახასიათებელი სიდიდეა.** სითბური წონასწორობისას სისტემის ყველა ნაწილში ტემპერატურას აქვს ერთი და იგივე მნიშვნელობა.

სხვადასხვა ტემპერატურის სხეულების შეხებისას სითბო მაღალი ტემპერატურის სხეულიდან დაბალი ტემპერატურის სხეულს გადაეცემა. პირიქით კი არასოდეს ხდება. ექსპერიმენტებითა და გამოთვლებით დაადგინეს, რომ ტემპერატურა პროპორციულია მოლეკულების საშუალო კინეტიკური ენერგიისა. მოლეკულის საშუალო კინეტიკური ენერგია გამოისახება ფორმულით:

$$\overline{E} = \frac{3}{2}kT, \text{ სადაც } k = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ ჯ/}^{\circ}\text{K}.$$

k -ს ეწოდება ბოლცმანის მუდმივა, T -ს – აბსოლუტური ტემპერატურა.

● აბსოლუტური ტემპერატურა

აირში წნევა გამოწვეულია ნაწილაკების დაჯახებით ჭურჭლის კედლებთან. რაც უფრო დიდია ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარე, მით მეტია დაჯახებები, ასევე ჭურჭლის კედლებზე გადაცემული იმპულსი და შესაბამისად აირის წნევა. ნაწილაკების ინტენსიური მოძრაობა სხეულის ტემპერატურას ზრდის. რაც უფრო მეტია ნაწილაკების რაოდენობა, მით მეტია მათ მიერ წარმოებული წნევა. დაადგინეს, რომ აირის წნევის შეფარდება ნაწილაკების კონცენტრაციასთან პროპორციულია აირის ტემპერატურის:

$$\frac{p}{n} = kT.$$

ამ ფორმულით გამოთვლილი ტემპერატურა დადებითია, რადგან ფორმულაში შემავალი ყველა სიდიდე დადებითია. ასე განსაზღვრულ ტემპერატურას **აბსოლუტური ტემპერატურა** უწოდეს. აბსოლუტური ნული ისეთი ტემპერატურაა, როდესაც წნევა ნულის ტოლი ხდება. ასეთი მდგომარეობა შეესაბამება სიტუაციას, როდესაც ნაწილაკი მინიმუმ ერთია და არაფერს ეჯახება. ამიტომ აბსოლუტური ნული ბუნებაში პრაქტიკულად მიუღწეველი ტემპერატურაა.

ინგლისელმა მეცნიერმა კელვინმა შემოიტანა აბსოლუტური ტემპერატურის სკალა. ამ სკალაზე ათვლილი ტემპერატურა იზომება კელვინებით (სურ. 60).

ერთი გრადუსი კელვინის სკალაზე ტოლია ერთი გრადუსისა ცელსიუსის სკალაზე. ამ სკალაზე ტემპერატურა აითვლება ნული გრადუსი კელვინიდან ($0K$).

კელვინის სკალაზე ნულ გრადუს ტემპერატურას ($0K$) ცელსიუსის სკალაზე შეესაბამება $-273,15^{\circ}\text{C}$.

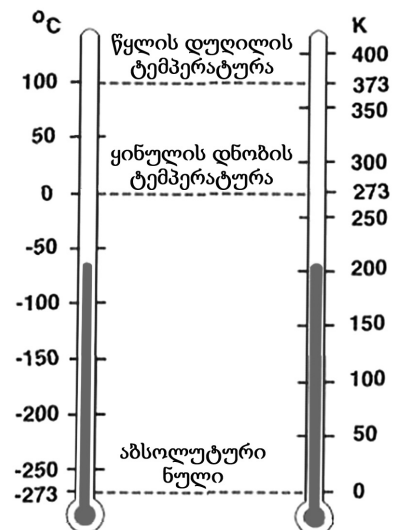
კელვინის სკალაზე ათვლილ ტემპერატურას (T) და ცელსიუსის სკალით ათვლილ ტემპერატურას (t) შორის კავშირი გამოისახება ფორმულით:

$$t = T - 273.$$

აქედან,

$$T = t + 273.$$

SI სისტემაში ტემპერატურის ერთეულია $1K$ (კელვინი).



სურ. 60

61. იდეალური აირი

აირს, რომლის მოლეკულებს შორის ურთიერთქმედება მხედველობაში არ მიიღება **იდეალური აირი** ეწოდება. იდეალური აირი რეალური აირის მოდელია.

ასეთ აირში მოლეკულებს შორის მანძილი გაცილებით მეტია მათ ზომებთან შედარებით და მოლეკულები მხოლოდ დაჯახებისას ურთიერთქმედებენ ძალიან მცირე დროის განმავლობაში. იდეალური აირია გაუხშობელი აირი (ჭურჭელში ამოტუმბვის შემდეგ დარჩენილი აირი).

აირი სხვადასხვა მდგომარეობაში შეიძლება იმყოფებოდეს. ესე იგი, მან შეიძლება დაიკავოს სხვადასხვა მოცულობა, ჰქონდეს სხვადასხვა წნევა. ამ სიდიდეებთან ერთად აირს ახასიათებენ აგრეთვე ტემპერატურით.

ამრიგად, აირის მდგომარეობა შეიძლება დავახასიათოდ მოცულობით – V , წნევით – p , ტემპერატურით – T . ამ სიდიდეებს **თერმოდინამიკური პარამეტრები** ეწოდება. აირის მდგომარეობის შეცვლისას იცვლება მისი მახასიათებელი თერმოდინამიკური პარამეტრები.

თუ სხეულებს ერთნაირი ტემპერატურა აქვთ, მაშინ მათ შორის სითბოცვლა არ ხდება.

62. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება

იდეალური აირის წნევა მისი მოლეკულების საშუალო კინეტიკურ ენერგიასთან დაკავშირებულია დამოკიდებულებით, რომელსაც აირის მდგომარეობის განტოლებას უწოდებენ. იგი გამოისახება ფორმულით:

$$p = \frac{2}{3} n \bar{E}. \quad \text{სადაც,} \quad \bar{E} = \frac{1}{2} m_0 \bar{v}^2,$$

m_0 აირის მოლეკულის მასა, $\bar{v}^2$ – მოლეკულის სიჩქარის კვადრატის საშუალო მნიშვნელობა. $n = \frac{N}{V}$ აირის მოლეკულების კონცენტრაცია, რაც ნიშნავს მოცულობის ერთეულში მოლეკულების რაოდენობას.

$$p = \frac{1}{3} n m_0 \bar{v}^2 = \frac{1}{3} \rho \bar{v}^2,$$

სადაც ρ აირის სიმკვრივეა.

იდეალური აირის წნევა ტემპერატურასთან დაკავშირებულია შემდეგი ფორმულით:

$$\frac{p}{n} = kT, \quad \text{აქედან} \quad p = nkT.$$

● კლავირონ-მენდელეევის განტოლება

ფორმულაში: $p = nkT$, ჩავსვათ $n = \frac{N}{V}$. მაშინ: $p = \frac{N}{V} kT$.

ვინაიდან $N = \frac{m}{M} N_A$, მივიღებთ: $p = \frac{m}{VM} N_A kT$

$$N_A k = R = 8,31 \text{ ჯ/მოლ } K.$$

R -ს **აირის უნივერსალურ მუდმივას** უწოდებენ.

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება მიიღებს შემდეგ სახეს:

$$pV = \frac{m}{M} RT,$$

ამ განტოლებას **კლავირონ-მენდელეევის განტოლებას** უწოდებენ. იგი სამართლიანია ნებისმიერი მასის იდეალური აირისათვის.

63. იდეალური აირის კანონები

იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება ერთმანეთთან აკავშირებს მოცემული მასის იდეალური აირის მდგომარეობის მახასიათებელ თერმოდინამიკურ პარამეტრებს: p – წნევას, V – მოცულობას და T – აბსოლუტურ ტემპერატურას. კლაპეირონ-მენდელეევის განტოლება შეიძლება ჩაინეროს ასე:

$$\frac{pV}{T} = \frac{m}{M}R.$$

მოცემული მასის აირისათვის განტოლების მარჯვენა მხარე მუდმივი სიდიდეა. ე. ი.

$$\frac{pV}{T} = \text{const},$$

ანუ

$$\frac{p_1 V_1}{T_1} = \frac{p_2 V_2}{T_2}.$$

მოცემულ განტოლებას უწოდებენ **კლაპეირონის** განტოლებას.

სხეულთა სისტემის მდგომარეობის ცვლილებას, როდესაც მისი მახასიათებელი თერმოდინამიკური პარამეტრები იცვლება **თერმოდინამიკური პროცესი** ეწოდება.

პროცესს, როდესაც ერთ-ერთი თერმოდინამიკური პარამეტრი მუდმივია და სხვა პარამეტრები იცვლება **იზოპროცესი** ეწოდება.

● ბოილ-მარიოტის კანონი

თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილების პროცესს მუდმივი ტემპერატურის პირობებში **იზოთერმული** პროცესი ეწოდება.

ინგლისელმა მეცნიერმა ბოილმა და მისგან დამოუკიდებლად ფრანგმა ფიზიკოსმა მარიოტმა შეისწავლეს კავშირი იდეალური აირის წნევასა და მოცულობას შორის მუდმივი ტემპერატურის პირობებში. ისინი მივიდნენ დასკვნამდე, რომ:

მუდმივი ტემპერატურის პირობებში მოცემული მასის აირის წნევისა და მოცულობის ნამრავლი მუდმივი სიდიდეა:

$$p_1 V_1 = p_2 V_2.$$

ეს ტოლობა სამართლიანია ჰერმეტიკულად დახურულ ჭურჭელში მოთავსებული იდეალური აირის წნევის ისეთი ნელი ცვლილებისას, როდესაც აირის მოცულობა იცვლება ტემპერატურის შეცვლის გარეშე, ანუ:

როცა $m = \text{const}$, $T = \text{const}$,

მაშინ $pV = \text{const}$. (1)

ექსპერიმენტით დადგენილ ამ კანონს ეწოდება **ბოილ-მარიოტის კანონი**.

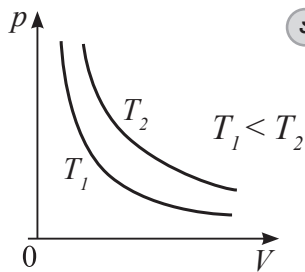
სითხეებისათვის ბოილ-მარიოტის კანონი არ არის სამართლიანი.

ბოილ-მარიოტის კანონი გამომდინარეობს იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლებიდანაც. იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების თანახმად:

$$pV = \frac{m}{M}RT.$$

როცა $m = \text{const}$ და $T = \text{const}$,

მაშინ $pV = \text{const}$

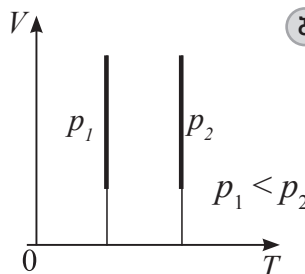


ა

მუდმივი ტემპერატურის პირობებში აირის წნევის დამოკიდებულება მოცულობაზე გრაფიკულად გამოისახება მრუდით, რომელსაც **იზოთერმა** ეწოდება (სურ. 61 ა). აირის იზოთერმა გამოსახავს უკუპროპორციულ დამოკიდებულებას წნევასა და მოცულობას შორის. სურათი 61 ბ და გ გამოსახავს იზოთერმებს V, T და p, T კოორდინატებში.

თითოეულ განსხვავებულ ტემპერატურას თავისი იზოთერმა შეესაბამება.

უფრო მაღალი T_2 ტემპერატურის შესაბამისი იზოთერმა დაბალი T_1 ტემპერატურის შესაბამისი იზოთერმაზე მაღლა მდებარეობს.



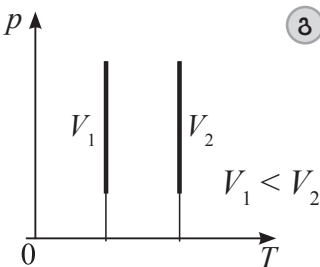
ბ

● გეი-ლუსაკის კანონი

თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილების პროცესს მუდმივი წნევის დროს **იზობარული პროცესი** ეწოდება. გეი-ლიუსაკმა შეისწავლა მუდმივი წნევის პირობებში მოცემული მასის იდეალური აირის მოცულობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე.

თუ წნევა არ იცვლება, მაშინ აირის ორი მდგომარეობისათვის გვექნება: $pV_1 = \frac{m}{M} RT_1$ და $pV_2 = \frac{m}{M} RT_2$. ამ ფორმულების ერთმანეთზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad (1)$$



გ

სურ. 61

მოცემული მასის აირის მოცულობათა შეფარდება მუდმივი წნევის დროს მისი აბსოლუტური ტემპერატურების შეფარდების ტოლია.

თუ აირის პირველ მდგომარეობად ავირჩიევთ ნორმალურ პირობებს (p_0 – ნორმალური ატმოსფერული წნევა, $T_0 = 273 \text{ K}$ – ცინულის დნობის ტემპერატურა, V_0 – მოცულობა ამ პირობებში), მეორე მდგომარეობაში სიდიდეებს აღვნიშნავთ V და T -თი, მაშინ (1)-დან მივიღებთ:

$$\frac{V}{V_0} = \frac{T}{T_0},$$

$$V = \frac{V_0 T}{T_0}, \quad (2)$$

აქედან,

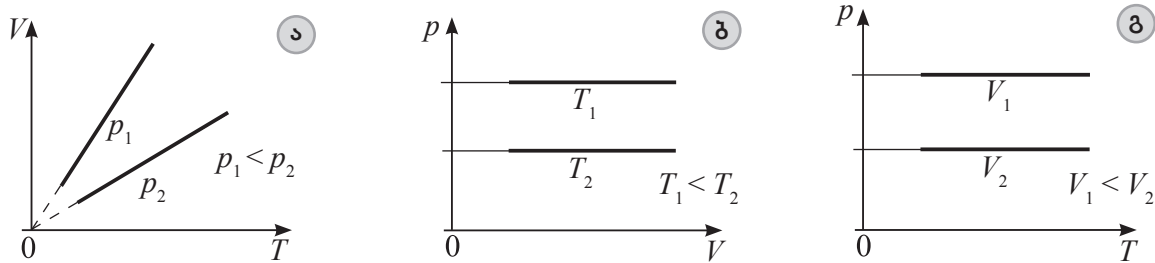
აღვნიშნოთ: $\alpha = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{273} \text{ K}^{-1}$, მაშინ (2)-დან მივიღებთ:

$$V = V_0 \alpha T = V_0 (1 + \alpha t). \quad (3)$$

α კოეფიციენტს აირის მოცულობითი გაფართოების ტემპერატურული კოეფიციენტი ეწოდება. (3)-დან ჩანს, რომ ტემპერატურის ერთი გრადუსით გაზრდისას ყველა აირის მოცულობა იზრდება იმ მოცულობის $1/273$ ნაწილით, რომელიც აირს ჰქონდა 273 K ტემპერატურაზე.

მუდმივი წნევის დროს მოცემული აირის მოცულობა აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია. ამ მტკიცებას **გეი-ლუსაკის კანონი** ეწოდება.

მუდმივი წნევის პირობებში აირის მოცულობის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე გრაფიკულად წრფით გამოისახება, რომელსაც **იზობარას** უწოდებენ. სხვადასხვა წნევას სხვადასხვა იზობარა შეესაბამება (სურ. 62 ა).



სურ. 42

სურ. 62 ბ და გ გამოსახული გრაფიკები შეესაბამება იზობარებს P , V და P , T კოორდინატებში.

● შარლის კანონი

თერმოდინამიკური სისტემის მდგომარეობის ცვლილების პროცესს მუდმივი მოცულობისას **იზოქორული პროცესი** ეწოდება.

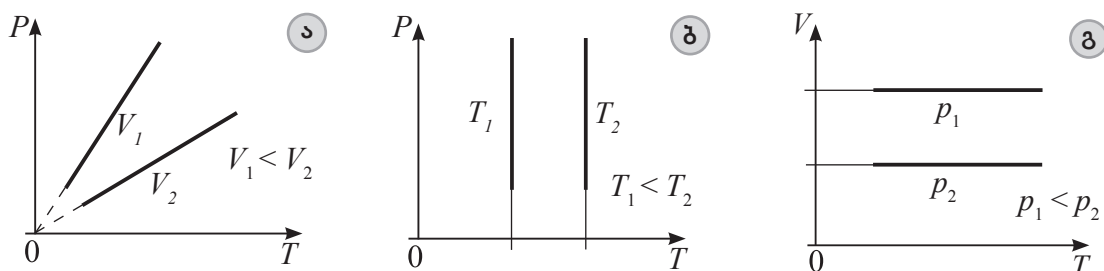
იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლების თანახმად ასეთ პირობებში აირის ორი მდგომარეობისათვის გვექნება: $p_1 V = \frac{m}{M} R T_1$ და $p_2 V = \frac{m}{M} R T_2$. ამ თანაფარდობების ერთმანეთზე გაყოფით მივიღებთ:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{T_1}{T_2}. \quad (1)$$

აირის ეს კანონი 1787 წელს ექსპერიმენტალურად დაადგინა ფრანგმა ფიზიკოსმა ჟ. შარლმა, რომელსაც შარლის კანონს უწოდებენ: **მუდმივი მოცულობის დროს ერთი და იმავე მასის აირის წნევა აბსოლუტური ტემპერატურის პირდაპირპროპორციულია.**

მუდმივი მოცულობის პირობებში აირის წნევის დამოკიდებულება ტემპერატურაზე გრაფიკულად გამოისახება წრფით, რომელსაც **იზოქორას** უწოდებენ. სხვადასხვა მოცულობას სხვადასხვა იზოქორა შეესაბამება (სურ. 63 ა).

სურ. 63 ბ და გ გამოსახული გრაფიკები შეესაბამება იზოქორებს P , T და V , T კოორდინატებში.



სურ. 63

დაბალი ტემპერატურის არეში იდეალური აირის იზობარები და იზოქორები იკვეთებიან $T = 0$ წერტილში. ძლიერი გაცივებისას ყველა აირი სითხედ იქცევა, სითხისათვის კი იდეალური აირის მდგომარეობის განტოლება არ არის სამართლიანი.

იდეალური აირის იზოქორები გვიჩვენებს (სურ. 63 ა), რომ წნევა აბსოლუტურ ნულზე სავსებით ისპობა. წნევა განპირობებულია მოლეკულების დაჯახებებით ჭურჭლის კედლებზე. მოლეკულების ქაოსური სითბური მოძრაობა არ შეიძლება შეწყდეს გარეგანი ზემოქმედებით, ამიტომ აბსოლუტური ნული არის ტემპერატურის მიუღწეველი ზღვარი, რომელსაც შეიძლება რაგინდ ახლოს მივუახლოვდეთ.

ძალიან დაბალი ტემპერატურების დროს იდეალური აირის მოდელი აღარ გამოდგება ნივთიერებაში მიმდინარე პროცესების აღსაწერად, ამიტომ იზობარების და იზოქორების იმ ნაწილს, რომელიც ასეთ დაბალ ტემპერატურებს შეესატყვისება, გამოხატავენ პუნქტირით.

64. შინაგანი ენერგია და მისი შეცვლის ხერხები

სხეულის შემადგენელი ყველა ნაწილაკის პოტენციური და კინეტიკური ენერგიების ჯამს **შინაგანი ენერგია** ეწოდება. შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია სხეულის შემადგენელ ნაწილაკებსა და მათ რიცხვზე, აგრეთვე მათი მოძრაობის სიჩქარეზე. რაც უფრო მეტია ნაწილაკების მოძრაობის სიჩქარე, და შესაბამისად, მათი კინეტიკური ენერგია, მით მეტია სხეულის ტემპერატურა და პირიქით.

შინაგანი ენერგია დამოკიდებულია აგრეთვე, ნივთიერების აგრეგატულ მდგომარეობაზე. სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობაში ნივთიერების მოლეკულები სხვადასხვა მანძილზე იმყოფებიან ერთმანეთისაგან. ანუ სხვადასხვაა მათი ურთიერთქმედების ენერგია, პოტენციური ენერგია. სხვადასხვა აგრეგატულ მდგომარეობაში ნაწილაკების პოტენციური ენერგიების განსხვავება განაპირობებს მათი შინაგანი ენერგიების განსხვავებას. ამრიგად, ნივთიერებას აიროვან მდგომარეობაში უფრო მეტი შინაგანი ენერგია აქვს, ვიდრე მყარ ან თხევად მდგომარეობაში. ერთატომიანი იდეალური აირის შინაგანი ენერგია

$$U = \frac{3}{2} \frac{m}{M} RT.$$

შინაგანი ენერგიის შეცვლის ორი გზა არსებობს: თბოგადაცემა და მუშაობის შესრულება.

● თბოგადაცემის სახეები

არსებობს თბოგადაცემის სამი სახე: თბოგამტარობა, კონვექცია და გამოსხივება.

შინაგანი ენერგიის გადაცემის მოვლენას სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეზე ან უშუალო შეხებისას ერთი სხეულიდან მეორეზე **თბოგამტარობა** ეწოდება.

მაგალითად, თუ ცხელი წყლით სავსე ჭიქაში ლითონის კოვზს მოვათავსებთ მისი ჰაერში მყოფი ნაწილიც გაცხელდება. ლითონები სითბოს კარგი გამტარები არიან.

თბოგამტარობით სითბოს გადაცემისას სითბური ენერგია ნივთიერების შემადგენელი ნაწილაკების ურთიერთქმედების შედეგად გადაეცემა სხეულის ერთი ნაწილიდან მეორეს. თბოგამტარობით თვით ნივთიერების გადატანა არ ხდება.

ნივთიერება, რომელიც სითბოს ცუდად ატარებს, თბოიზოლატორია.

მაგ., ხე, მინა, პლასტმასი, ჰაერი, ვაკუუმი.

სითხესა და აირში ნივთიერების ნაკადით ენერგიის გადაცემას კონვექცია ეწოდება.

კონვექციისას ენერგია გადააქვს სითხის ან აირის ფენებს, რომლებიც ნივთიერების არათანაბარი გათბობის გამო მოძრაობენ. კონვექციისას ხდება ნივთიერების გადატანა.

ბუნებაში კონვექციის მაგალითებია ქარი და ზღვის დინებები.

მზესა და დედამიწას შორის უზარმაზარი უჰაერო სივრცეა. ამიტომ სითბოს გადაცემა მზიდან დედამიწამდე ვერც კონვექციით განხორციელდება და ვერც – თბოგამტარობით. სითბოცვლა დედამიწასა და მზეს შორის **გამოსხივებით** ხდება.

გამოსხივებით ნივთიერების გადატანა არ ხდება. მხოლოდ ენერგია გადაეცემა ერთი სხეულიდან მეორეს.

სხეული სხივებს შთანთქავს, რის შედეგადაც მისი შინაგანი ენერგია იზრდება.

სითბურ ენერგიას ყველა სხეული ასხივებს. ამასთან დადგენილია, რომ მუქი ფერის სხეული მეტ ენერგიას შთანთქავს და გამოასხივებს, ვიდრე ღია ფერის სხეული.

გამოსხივების ენერგია დამოკიდებულია სხეულის ტემპერატურაზე. რაც მეტია სხეულის ტემპერატურა, მით მეტ ენერგიას გამოასხივებს იგი.

ამრიგად: მყარ სხეულებში სითბოს გადაცემა ხდება თბოგამტარობით; სითხეებში მეტწილად კონვექციით, უმნიშვნელოდ თბოგადაცემით; აირებში სითბოს გადაცემა ხდება კონვექციით. გამოსხივებით სითბოს გადაცემა ხდება ყოველგვარ გარემოში ვაკუუმის ჩათვლით. გამოსხივებული ენერგიის შთანთქმით ხდება სხეულების გათბობა. თუ გარემოში გამოსხივების შთანთქმელი არ არის გარემო არ გათბება.

65. სითბოს რაოდენობა

სხეულის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ხასიათდება ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც **სითბოს რაოდენობას** უწოდებენ. სითბოს რაოდენობა აღინიშნება Q ასოთი. **სითბოს რაოდენობა არის ენერგია**, რომელსაც სხეული იღებს ან კარგავს თბოგადაცემისას. რადგან სითბოს რაოდენობა არის ენერგია, ამიტომ მისი საზომი **ერთეული SI სისტემაში არის 1 ჯოული (ჯ)**.

სითბოს რაოდენობას, რომელიც საჭიროა 1 კგ მასის ნივთიერების 1° -ით გასათბობად, ნივთიერების **კუთრი სითბოტევადობა** ეწოდება და c ასოთი აღინიშნება.

$$c = \frac{Q}{m(t_2 - t_1)}.$$

კუთრი სითბოტევადობის ერთეულია: $1 \frac{\text{ჯ}}{\text{კგ} \cdot \text{გრად}}$ ან $\frac{\text{ჯ}}{\text{კგ K}}$.

კუთრი სითბოტევადობა მოცემული ნივთიერებისათვის მუდმივი სიდიდეა. ამგვარად, სხეულის გასათბობად საჭირო სითბოს რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = cm(t_2 - t_1),$$

სადაც c – ნივთიერების კუთრი სითბოტევადობაა, m – სხეულის მასა, t_1 – სხეულის საწყისი ტემპერატურა, t_2 – სხეულის საბოლოო ტემპერატურა.

სხეულის გაცივებისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა

$$Q = -cm(t_2 - t_1).$$

„—“ ნიშანი მიუთითებს იმაზე, რომ ტემპერატურის ცვლილება უარყოფითია.

$cm = C$ უწოდებენ სხეულის სითბოტევადობას.

სხეულის სითბოტევადობის ერთეულია 1ჯ/კ .

66. საწვავის წვის კუთრი სითბო

ნივთიერების წვა ქიმიური პროცესია, რომელიც სითბოს გამოყოფით მიმდინარეობს.

1 კგ მასის სათბობის წვისას გამოყოფილ სითბოს რაოდენობას **წვის კუთრი სითბო** ეწოდება და აღინიშნება q ასოთი.

სათბობის წვის კუთრი სითბო არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც ტოლია სათბობის მთლიანად დაწვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის შეფარდებისა სათბობის მასასთან:

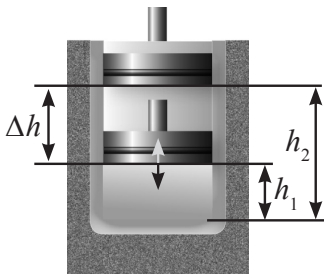
$$q = \frac{Q}{m}.$$

ერთი და იმავე სათბობის წვისას რაც უფრო მეტია მისი მასა, მით მეტი სითბო გამოიყოფა. ამრიგად, m მასის სათბობის სრული წვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა

$$Q = qm,$$

სადაც Q სათბობის წვისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობაა, m – სათბობის მასა, ხოლო q – წვის კუთრი სითბო. SI სისტემაში წვის კუთრი სითბოს ერთეულია – ჯ/კგ .

67. მუშაობა თერმოდინამიკაში



სურ. 64

თერმოდინამიკა ფიზიკის ნაწილია, რომელიც შეისწავლის ენერგიის გადასვლას ერთი სხეულიდან მეორეში სითბოს გადაცემით ან მუშაობის შესრულებით. ენერგიის ცვლილება განსაზღვრავს შესრულებული მუშაობის სიდიდეს.

იდეალური აირის მიერ მაკროსკოპიული მუშაობის შესრულება განვიხილოთ შემდეგი წარმოსახვითი ცდის საფუძველზე. დავუშვათ, ცილინდრში მოთავსებულია იდეალური აირი, რომელსაც N ფართობის უწონადი დგუში გამოყოფს ატმოსფეროსგან (სურ. 64). თუ p ატმოსფერული წნევაა, მაშინ, უწონადი დგუშის ქვეშ წონასწორობის პირობებში იდე-

ალური აირის წნევაც p -ს ტოლია. თუ დგუშის ქვევით ცილინდრში მოთავსებულ იდეალურ აირს გავატობთ, მისი ტემპერატურა მოიცვლება. იდეალური აირის მოლეკულები უფრო ინტენსიურად დაეჯახებიან დგუშს ქვევიდან, ვიდრე ეჯახება ატმოსფეროს მოლეკულები დგუშს ზევიდან. წონასწორობა დაირღვევა და დგუში ზევით გადაადგილდება. დგუშის ზევით გადაადგილებისას, ცილინდრში მოთავსებული იდეალური აირი ისე ფართოვდება, რომ მისი წნევა შესამჩნევად ვერ ასწრებს მომატებას. ამ შემთხვევაში იდეალური აირის გაფართოება მუდმივი წნევის პირობებში, ანუ **იზობარულად** მიმდინარეობს. იდეალური აირის გაფართოებისას დგუშზე მოქმედებს $F = pS$ ძალა. ეს ძალა ასრულებს მუშაობას, რადგან ამ ძალის მოქმედებით დგუში გადაადგილდება $\Delta h = h_2 - h_1$ მანძილზე. იდეალური აირის იზობარული გაფართოების დროს შესრულებული მუშაობა იქნება:

$$A = F\Delta h = pS\Delta h = pS(h_2 - h_1).$$

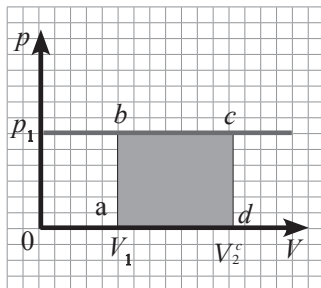
მაგრამ

$$S(h_2 - h_1) = Sh_2 - Sh_1 = V_2 - V_1 = \Delta V,$$

ამიტომ,

$$A = pS(h_2 - h_1) = p\Delta V. \quad (1)$$

როცა აირი ფართოვდება, $\Delta V > 0$. ამ დროს იდეალური აირი ასრულებს დადებით მუშაობას, $A > 0$. როცა გარეშე ძალა მოქმედებს დგუშზე და კუმშავს აირს, $\Delta V < 0$, მაშინ აირის მიერ შესრულებული მუშაობა უარყოფითია, $A < 0$. გარე ძალის მიერ შესრულებული მუშაობა A' დადებითია. $A' = -A$.



სურ. 65

● მუშაობის გეომეტრიული განმარტება

65-ე სურათზე გამოსახულია აირის წნევის მოცულობაზე დამოკიდებულების გრაფიკი. $abcd$ მართკუთხედის ფართობი, რომელიც შემოსაზღვრულია $p_1 = \text{const}$ გრაფიკით, V ღერძით, საწყისი V_1 და საბოლოო V_2 მოცულობების შესაბამისი ორდინატებით რიცხობრივად შესრულებული მუშაობის ტოლია:

$$A = P_1(V_2 - V_1) = S_{abcd}.$$

68. თერმოდინამიკის I კანონი

სისტემის შინაგანი ენერგიის ცვლილება მისი გადასვლისას ერთი მდგომარეობიდან მეორეში, ტოლია გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობისა და სისტემისათვის გადაცემული სითბოს რაოდენობის ჯამისა:

$$\Delta U = A_{\text{გარე}} + Q. \quad (1)$$

თანაფარდობა (1) გამოხატავს **თერმოდინამიკის პირველ კანონს**.

თუ სისტემას გარედან არ გადაეცემა სითბოს რაოდენობა, ანუ $Q = 0$ და არ იცვლება სისტემის შინაგანი ენერგია, ეს ნიშნავს, რომ $\Delta U = 0$ მაშინ, $A_{\text{შიდა}} = A_{\text{გარე}} = 0$. ეს ნიშნავს, რომ გარედან სითბოს რაოდენობის მიუღებლად და შინაგანი ენერგიის შეუცვლელად სისტემას მუშაობის შესრულება არ შეუძლია და ასეთ პირობებში არც გარეშე სხეულები ასრულებენ მუშაობას სისტემაზე ზემოქმედებით.

თუ სხეული (აირი) ასრულებს მუშაობას, მაშინ $\Delta U = Q - A_{\text{შიდა}}$.

თუ სხეული კარგავს სითბოს, მაშინ $\Delta U = A_{\text{გარე}} - Q$.

69. თერმოდინამიკის I კანონის გამოყენება იზოპროცესებში

თერმოდინამიკის პირველი კანონის საშუალებით შეგვიძლია მნიშვნელოვანი დასკვნები გამოვიტანოთ სხვადასხვა პროცესების, მაგალითად, იზოპროცესების ხასიათის შესახებ. ყველაზე მარტივია შემთხვევა, როდესაც სისტემა წარმოადგენს იდეალურ აირს.

● იზოქორული პროცესი

იზოქორული პროცესის დროს მოცულობა არ იცვლება და ამიტომ აირის მუშაობა ნულის ტოლია $A = p\Delta V = 0$. მაშინ ფორმულიდან: $\Delta U = A + Q$ გამომდინარეობს, რომ ასეთ პირობებში:

$$\Delta U = Q. \quad (1)$$

ე. ი. სისტემის ენერგიის ცვლილება იზოქორული პროცესის დროს ტოლია გაცემული ან მიღებული სითბოს რაოდენობისა.

თუ აირი თბება, $Q > 0$ და $\Delta U > 0$, მაშინ მისი შინაგანი ენერგია იზრდება. აირის გაცივების დროს $Q < 0$ და $\Delta U = U_2 - U_1 < 0$, შინაგანი ენერგიის ცვლილება უარყოფითია ე. ი. აირის შინაგანი ენერგია მცირდება.

● იზოთერმული პროცესი

იზოთერმული პროცესის დროს იდეალური აირის შინაგანი ენერგია, ცხადია, არ იცვლება, რადგანაც შინაგანი ენერგია იცვლება მხოლოდ ტემპერატურის ცვლილებით. მაშინ $Q = \Delta U + A_{\text{შიდა}}$ ფორმულის თანახმად გვექნება:

$$\Delta U = 0 \quad \text{და} \quad Q = A_{\text{შიდა}}. \quad (2)$$

ე. ი. იზოთერმული პროცესის დროს სისტემისათვის გადაცემული მთელი სითბოს რაოდენობა ხმარდება შიდა ძალების მიერ მუშაობის შესრულებას.

თუ აირი სითბოს ღებულობს ($Q > 0$), მაშინ ის ასრულებს დადებით მუშაობას $A_{\text{შიდა}} > 0$. თუ, პირიქით, აირი სითბოს გადასცემს გარემოს, მაშინ $A_{\text{შიდა}} < 0$. ამ შემთხვევაში გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა დადებითია ($A_{\text{გარე}} > 0$).

● იზობარული პროცესი

იზობარული პროცესისთვის უნდა გამოვიყენოთ ზოგადი თანაფარდობა $Q = \Delta U + A_{\text{შიდა}}$. თუ აირი თბება ($Q > 0$), ის ფართოვდება და დადებით მუშაობას ასრულებს ($A_{\text{შიდა}} > 0$). ერთდროულად იზრდება მისი შინაგანი ენერგია ($\Delta U > 0$). გაცივების დროს ($Q < 0$) აირი იკუმშება და აირზე მოქმედი გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშობა დადებითია ($A_{\text{გარე}} > 0$), მისი შინაგანი ენერგია კლებულობს ($\Delta U < 0$).

● ადიაბატური პროცესი

განვიხილოთ ისეთი თერმოდინამიკური სისტემა, რომელიც გარშემო მყოფ სხეულებთან სითბოცვლაში არ მონაწილეობს. ასეთ სისტემას **თბოიზოლირებული ენოდება. თბოიზოლირებულ სისტემაში მიმდინარე პროცესს ადიაბატურს უწოდებენ.**

ადიაბატური პროცესის დროს $Q = 0$.

$\Delta U = A_{\text{გარე}} + Q$ ფორმულის თანახმად, მუშაობის შესრულება შინაგანი ენერგიის ცვლილების ხარჯზე ხდება:

$$\Delta U = A_{\text{გარე}}. \quad (3)$$

ცხადია, იდეალურად იზოლირებული სისტემები ბუნებაში არ არსებობს, მაგრამ თუ განვიხილავთ საკმაოდ სწრაფად მიმდინარე პროცესს, რომლის განმავლობაშიც არ ხდება შესამჩნევი სითბოცვლა სისტემასა და გარემოს შორის, მაშინ ეს პროცესი შეგვიძლია ადიაბატურ პროცესად მივიჩნიოთ.

განტოლება (3)-ის თანახმად, გარეზე ძალების მიერ სისტემაზე დადებითი მუშაობის შესრულების დროს, მაგალითად, აირის შეკუმშვისას, მისი შინაგანი ენერგია იზრდება. ეს კი ნიშნავს აირის ტემპერატურის მომატებას. პირიქით, აირის ადიაბატური გაფართოებისას თვით აირი ასრულებს დადებით მუშაობას, ხოლო გარე ძალები უარყოფით მუშაობას ($A_{\text{გარე}} < 0$) და მისი შინაგანი ენერგია კლებულობს, შედეგად აირი ცივდება.

70. სითბური ბალანსი

განვიხილოთ სითბოცვლა ისეთი სისტემის შიგნით, რომელიც სხვადასხვა ტემპერატურის სხეულებისაგან შედგება. დავუშვათ, სისტემა საკმაოდ იზოლირებულია გარემოდან და მისი შინაგანი ენერგია არ იცვლება (ჩაკეტილი სისტემა). თუ სისტემის შიგნით არავითარი მუშაობა არ სრულდება, მაშინ სისტემის რომელიმე სხეულის შინაგანი ენერგიის ცვლილება ტოლია სითბოს რაოდენობისა, რომელიც ამ სხეულმა გასცა ან მიიღო სისტემის შიგნით სითბური წონასწორობის დამყარებამდე, ე. ი. $\Delta U_i = Q_i$. თუ შევკრებთ მსგავს სიდიდეებს სისტემის ყველა სხეულისათვის და გავითვალისწინებთ, რომ სისტემის შინაგანი ენერგია არ იცვლება, ანუ $\Delta U = 0$, მივიღებთ განტოლებას:

$$Q_1 + Q_2 + Q_3 + \dots = 0. \quad (4)$$

ამ განტოლებას სითბური ბალანსის განტოლება ეწოდება. აქ $Q_1, Q_2, Q_3, \dots$ სხეულების მიერ მიღებული ან გაცემული სითბოს რაოდენობებია.

მიღებული სითბოს რაოდენობა დადებითია, გაცემული სითბოს რაოდენობა უარყოფითია.

71. დნობა და გამყარება

სითბოს რაოდენობას, რომელიც საჭიროა დნობის ტემპერატურამდე მიყვანილი 1 კგ კრისტალური ნივთიერების მთლიანად გასადნობად, დნობის კუთრი სითბო ეწოდება. დნობის კუთრი სითბო აღინიშნება λ ასოთი (ბერძნული ასო – ლამბდა).

$$\lambda = \frac{Q}{m},$$

სადაც Q – მიღებული სითბოს რაოდენობაა, m – სხეულის მასა.

SI სისტემაში დნობის კუთრი სითბოს ერთეულია 1 ჯ/კგ.

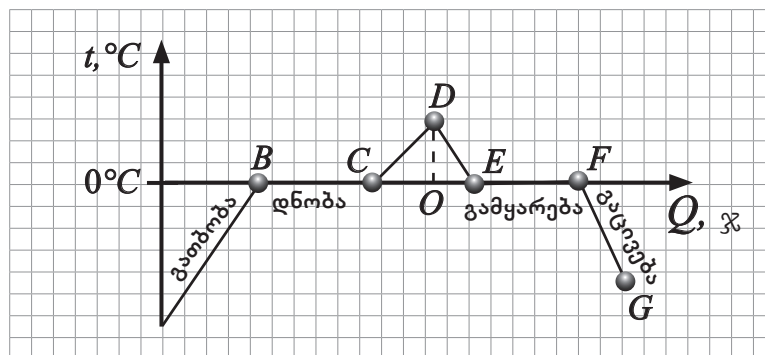
თუ ცნობილია ნივთიერების დნობის კუთრი სითბო λ , მაშინ დნობის ტემპერატურამდე მიყვანილი m მასის ნივთიერების გასადნობად საჭირო სითბოს რაოდენობა გამოითვლება ფორმულით:

$$Q = \lambda m.$$

სხვადასხვა ნივთიერების დნობის კუთრი სითბო სხვადასხვაა. ეს განსხვავება მათი აღნაგობითაა გამოწვეული. კრისტალური აგებულების მყარი სხეულის ტემპერატურა დნობის პროცესში უცვლელია მიუხედავად იმისა, რომ მას სითბო განუწყვეტლივ მიეწოდება. დნობის პროცესში მოლეკულებს შორის არსებული მიზიდვის ძალა აღარ არის საკმარისი მათი წინანდელი მდგომარეობის შესანარჩუნებლად, ირღვევა კრისტალური აგებულება და სხეული დნება. სწორედ $Q = \lambda m$ სითბოს რაოდენობაა საჭირო m მასის სხეულის კრისტალური აღნაგობის რღვევისათვის.

შებრუნებული პროცესი ხდება ნივთიერების გამყარებისას. გამყარების პროცესშიც ნივთიერების ტემპერატურა არ იცვლება, ვიდრე მთლიანად არ გამყარდება სხეული. ამ დროს გამოიყოფა სითბო იგივე რაოდენობა, რამდენიც მიიღო ამ ნივთიერებამ დნობისას.

66-ე სურათზე გამოსახულია ყინულის დნობისა და წყლის გამყარების გრაფიკი.



სურ. 66

გრაფიკზე O წერტილის მარჯვენა მხარეს გამოსახულია წყლის გაციებისას ტემპერატურის დამოკიდებულება გამოყოფილი სითბოს რაოდენობაზე. გრაფიკიდან ჩანს, რომ სითბოს რა რაოდენობასაც შთანთქავს სხეული დნობისას (BC უბანი), იმავე რაოდენობის სითბოს გამოყოფს გამყარებისას (EF უბანი).

72. აორთქლება და კონდენსაცია

თავდახურულ ჭურჭელში სითხის აორთქლებისას, თავდაპირველად სითხიდან ამოსული მოლეკულების რიცხვი ბევრად მეტია სითხეში დაბრუნებული მოლეკულების რიცხვზე. ამიტომ ჭურჭელში ორთქლის სიმკვრივე თანდათან იზრდება. ორთქლის სიმკვრივის ზრდისას იზრდება იმ მოლეკულების რიცხვიც, რომლებიც ქაოსური მოძრაობის გამო სითხეს უბრუნდება. ბოლოს სითხიდან ამოსული და უკან დაბრუნებული მოლეკულების რიცხვი ერთმანეთს გაუტოლდება. ამ მომენტიდან სითხის ზედაპირის ზემოთ მყოფი მოლეკულების რაოდენობა მუდმივი გახდება. დამყარდება ეგრეთ წოდებული **დინამიკური წონასწორობა** სითხესა და მის ორთქლს შორის. ასეთ ორთქლს **ნაჯერი ორთქლი** ეწოდება.

ჰაერში ნაჯერი ორთქლის არსებობისას წარმოიქმნება ნამი – წყლის წვეთები. დინამიკური წონასწორობისას დახურულ ჭურჭელში სითხის მასა არ იცვლება მაშინაც კი, როცა სითხე აგრძელებს აორთქლებას.

ნივთიერება მყარი მდგომარეობიდან აიროვან მდგომარეობაში შეიძლება გადავიდეს თხევადი მდგომარეობის გარეშე. ამ პროცესს **სუბლიმაციას (აქროლვას)** უწოდებენ. სუბლიმაცია შესაძლებელია ნებისმიერ ტემპერატურასა და წნევაზე მყარი და აიროვანი მდგომარეობების თანაარსებობისას.

სუბლიმაციის მაგალითებია: ნაფთალინის, იოდის კრისტალების აქროლვა.

აორთქლებისას სითხის (სხეულის) ტემპერატურა მცირდება.

● დუღილი. დუღილის ტემპერატურის დამოკიდებულება წნევაზე

ექსპერიმენტული გამოკვლევებით დადგინდა, რომ დუღილის ტემპერატურამდე მიყვანილი სითხის ორთქლად გადაქცევისათვის საჭირო სითბოს რაოდენობა დამოკიდებულია ამ სითხის მასასა და გვარობაზე. მაგალითად, დუღილის ტემპერატურამდე მიყვანილი 1 კგ წყლის ორთქლად გადაქცევისათვის საჭიროა $2,3 \cdot 10^6$ ჯ სითბო, ხოლო 1 კგ სპირტისათვის კი $-0,9 \cdot 10^6$ ჯ.

ფიზიკურ სიდიდეს, რომელიც გვიჩვენებს სითბოს რა რაოდენობაა საჭირო 1 კგ სითხის ასაორთქლებლად ტემპერატურის შეუცვლელად, ორთქლადქცევის კუთრი სითბო ეწოდება.

ორთქლადქცევის კუთრი სითბო აღინიშნება L ასოთი:

$$L = \frac{Q}{m},$$

სადაც Q – სითხის ასაორთქლებლად საჭირო სითბოს რაოდენობაა, m კი ამ სითხის მასაა.

$$Q = Lm.$$

SI სისტემაში ორთქლადქცევის კუთრი სითბოს ერთეულია 1 ჯ/კგ.

ზუსტმა ექსპერიმენტებმა გვიჩვენა, რომ მოცემულ ტემპერატურაზე m მასის ორთქლის კონდენსაციისას გამოიყოფა იმავე რაოდენობის სითბო, რაც საჭიროა იგივე მასის სითხის ასაორთქლებლად იმავე ტემპერატურაზე. აქედან გამომდინარე, დუღილის ტემპერატურამდე მიყვანილი ორთქლის კონდენსაციისას გამოყოფილი სითბოს რაოდენობა

$$Q = -Lm.$$

წყალი ყოველთვის შეიცავს ჰაერის ბუშტულებს. როდესაც წყალი თბება, მასთან ერთად თბება ბუშტულებში არსებული ჰაერი. წყლის აორთქლება ხდება არა მარტო ზედაპირიდან, არამედ წყლის შიგნითაც – ჰაერის ბუშტულებში, რის გამოც ბუშტულების მოცულობა იზრდება. მოცულობის გაზრდის გამო იზრდება მასზე მოქმედი არქიმედეს (ამომგდები) ძალა. ამიტომ ბუშტულა იწყებს მოძრაობას ზევით, წყლის ზედაპირისაკენ. როცა წყლის ზედა ფენები შედარებით ცივია, ბუშტულაში მყოფი წყლის ორთქ-

ლი ცივდება და კონდენსირდება. ამიტომ ბუშტულები ზედაპირამდე ვერ აღწევს და ქრება. როდესაც წყლის ზედა ფენები საკმარისად გათბება, ბუშტულებში გაიზრდება ორთქლადქცეული მოლეკულების რიცხვი და, შესაბამისად, გაიზრდება ორთქლის წნევა. როდესაც ორთქლის წნევა გაუტოლდება ან გადააჭარბებს სითხის ზედაპირზე არსებულ ჰაერის წნევას, ბუშტულები სკდება და ისმის ხმა – სითხე იწყებს დუღილს.

დუღილი ეწოდება ორთქლადქცევის პროცესს, რომელიც მიმდინარეობს, როგორც სითხის ზედაპირიდან ასევე შიდა ფენებიდან.

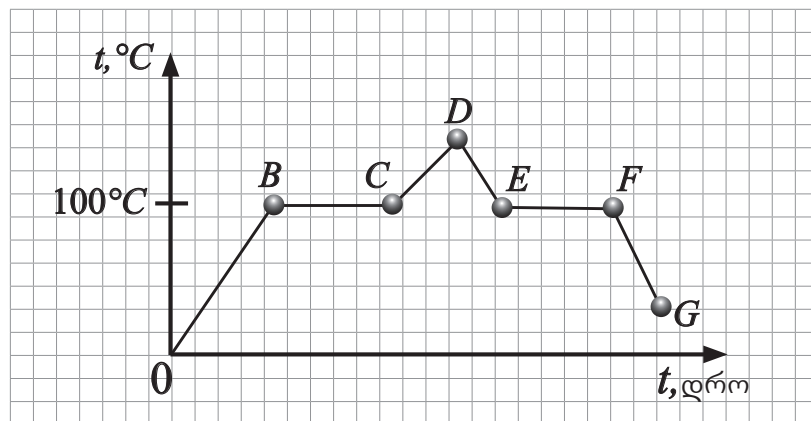
ორთქლის შინაგანი ენერგია მეტია იმავე ტემპერატურისა და მასის წყლის შინაგან ენერგიაზე.

ყველა სითხეს გააჩნია მისთვის დამახასიათებელი დუღილის ტემპერატურა. სითხის დუღილის ტემპერატურა დამოკიდებულია მის ზედაპირზე არსებულ ჰაერის წნევაზე.

სითხის ზედაპირზე წნევის გაზრდით იზრდება სითხის დუღილის ტემპერატურა. შემცირებით — მცირდება. დუღილის ტემპერატურა დამოკიდებულია ატმოსფერულ წნევაზე. მაგ., რაც უფრო მაღლაა წყალი ზღვის დონიდან, მით უფრო დაბალია წყლის დუღილის ტემპერატურა. ნორმალური ატმოსფერული წნევისას წყლის დუღილის ტემპერატურაა 100°C .

დუღილის პროცესი შეიძლება დავახასიათოთ გრაფიკით, რომელზეც გამოსახულია სითხის ტემპერატურის დამოკიდებულება გათბობის დროზე (სურ. 67).

გრაფიკის OB უბანი ასახავს სითხის გათბობას, BC – დუღილის პროცესს, CD – წყლის ორთქლის გაცხელებას, EF – ორთქლის კონდენსაციის პროცესს, FG – სითხის გაცივებას.



სურ. 67

გრაფიკიდან ჩანს დრო, რომელიც საჭიროა დუღილის ტემპერატურამდე მიყვანილი რაიმე რაოდენობის წყლის სრულად ასაორთქლებლად (BC უბანი), იგივე დროა საჭირო ამავე რაოდენობის წყლის მისაღებად ორთქლის კონდენსაციისას (EF უბანი). იგივე შეიძლება ვიგულისხმოთ სითხის რაოდენობაზე ორთქლადქცევისა და კონდენსაციისათვის.

ამგვარად, სითხის რა რაოდენობაც არის საჭირო სითხის ორთქლადქცევისათვის, სითხის იგივე რაოდენობა გამოიყოფა ორთქლის კონდენსაციისას.

73. ელექტრული მუხტის შენახვის კანონი

● ელექტრული მუხტი

ძველთაგან ცნობილი იყო, რომ ზოგიერთი სხეული ხახუნის შედეგად ამჟღავნებდა მცირე ზომის ნაწილაკების მიზიდვის უნარს. ეს უნარი ყველაზე მკაფიოდ ქარვის ხახუნის დროს შეიმჩნეოდა. ქარვას ბერძნულად – ელექტრონი ქვია, ამიტომ ამ მოვლენას ელექტრული მოვლენა ეწოდა. ელექტრული მოვლენები განპირობებულია იმ ნაწილაკების ურთიერთქმედებით, რომელთაც ელექტრული მუხტი აქვთ. ბუნებაში ორი სახის მუხტი არსებობს: დადებითი და უარყოფითი. **ელექტრული მუხტი ფიზიკური სიდიდეა და აღინიშნება q ასოთი.** მოვლენას, რომლის დროსაც სხეულების დამუხტვა ხდება, **ელექტრიზაცია** ეწოდება. SI სისტემაში მუხტის ერთეულია **1 კულონი (1 კ).**

პრაქტიკაში გამოიყენება მუხტის სხვა ერთეულებიც: 1 მილიკულონი (მკ) = 10^{-3} კ. მიკროკულონი (მკკ) = 10^{-6} კ, 1 ნანოკულონი (ნკ) = 10^{-9} კ.

ბუნებაში არსებული ელემენტარული მუხტი SI სისტემაში (სიდიდით) ტოლია $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ კ. ელექტრონის მუხტი სიდიდით ელემენტარული მუხტის ტოლია, ნიშანი კი უარყოფითი აქვს.

ნებისმიერი დამუხტული ნაწილაკის მუხტი q ელემენტარული ელექტრული მუხტის e -ს ჯერადია, ანუ $q = n \cdot e$, სადაც n მთელი რიცხვია.

მუხტი ნაწილაკის გარეშე არ არსებობს, ნაწილაკის მუხტი შესაძლებელია ნულის ტოლი იყოს.

ერთნიშნაანი მუხტები ერთმანეთს განიზიდავენ, სხვადასხვა ნიშნის მუხტები ერთმანეთს მიიზიდავენ. თუ ატომი კარგავს ელექტრონს მიიღება დადებითი იონი. ატომის მიერ ელექტრონის ჩაჭერისას მიიღება უარყოფითი იონი.

ელექტრობის ნაწილს, რომელშიც შეისწავლება უძრავი ელექტრული მუხტების ურთიერთქმედების კანონზომიერებები, **ელექტროსტატიკა** ეწოდება.

სისტემას, რომელშიც მხოლოდ მასში მყოფი მუხტები ურთიერთქმედებენ და გარედან მუხტი არც გადაეცემათ და არც წაერთმევა იზოლირებული სისტემა ეწოდება.

ელექტრული მუხტები იკრიბება. სისტემის მუხტი მასში შემავალი მუხტების ჯამის ტოლია. თუ სხეულის მუხტი $q = 0$, ნიშნავს, რომ მასში შემავალი დადებითი და უარყოფითი მუხტების ჯამი 0-ის ტოლია. ამით აიხსნება ატომის ნეიტრალობა. ატომის ბირთვი დადებითადაა დამუხტული, ელექტრონები უარყოფითად, ხოლო ატომის მუხტი ნულის ტოლია.

თუ ერთი ნაწილაკის მუხტია q_1 , მეორისა q_2 , მაშინ მათი შეხებისა და განცალკავების შემდეგ თითოეულის მუხტი იქნება

$$q = \frac{q_1 + q_2}{2}.$$

თუ სხეულების ან ნაწილაკების მუხტის სიდიდეებს აღვნიშნავთ $q_1, q_2, \dots, q_n$, მაშინ იზოლირებულ სისტემაში მყოფი მუხტების ნებისმიერი ურთიერთქმედებისას მათი ჯამური ელექტრული მუხტი მუდმივი სიდიდეა (მუხტი ინახება):

$$q_1 + q_2 + \dots + q_n = q'_1 + q'_2 + \dots + q'_n.$$

ე. ი. იზოლირებულ სისტემაში დამუხტული ნაწილაკების ურთიერთქმედებამდე მათი მუხტების ჯამი ტოლია ამ ნაწილაკების მუხტების ჯამისა ურთიერთქმედების შემდეგ.

ელექტრული მუხტის შენახვის კანონი სრულდება ყოველთვის, როცა მუხტების მოცემული სისტემა ჩაკეტილია. ელემენტარული ნაწილაკების გაჩენისას ან მოსპობისას, ისინი წყვილ-წყვილად იბადებიან ურთიერთ საპირისპირო ნიშნის მუხტით, ან ქრებიან (**ანიჰილირებენ**) ისე, რომ საერთო მუხტი სისტემაში უცვლელი რჩება. ხახუნით სხეულების დაელექტროების პროცესში მონაწილეობს ნივთიერების შემადგენელი ატომების ძალიან მცირე რაოდენობა, რომლებიც სხეულის ზედაპირზე არიან განთავსებული. ხახუნი სხეულებს შორის მჭიდროდ შეხების ფართობს ზრდის, რის შედეგად ელექტრონები ერთი სხეულიდან მეორეზე გადადიან.

74. კულონის კანონი

გრეხითი სასწორის გამოყენებით ჩატარებული ცდების შედეგების საფუძველზე კულონმა ჩამოაყალიბა კანონი:

ნერტილოვან მუხტებს შორის ურთიერთქმედების ძალის მოდული პირდაპირპროპორციულია მუხტების სიდიდეების ნამრავლის, უკუპროპორციულია მათ შორის მანძილის კვადრატის და მიმართულია მუხტების შემაერთებელი წრფის გასწვრივ.

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{r^2}.$$

პროპორციულობის კოეფიციენტი $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0},$

სადაც ϵ_0 ელექტრული მუდმივაა

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \frac{\text{კ}^2}{\text{ნმ}^2},$$

ამიტომ $k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ნ} \cdot \text{მ}^2}{\text{კ}^2}.$

k რიცხობრივად ტოლია ძალის, რომლითაც ვაკუუმში ურთიერთქმედებს ორი, თითო კულონი სიდიდის, ნერტილოვანი მუხტი, თუ მათ შორის მანძილი ერთი მეტრია. ეს ძალიან დიდი ძალაა, რომელიც დაახლოებით ეგვიპტის პირამიდების წონას უტოლდება. ამ შეფასებიდან ჩანს, რომ კულონი მუხტის დიდი ერთეულია. ამიტომ შემოღებულია კულონის წილადი ერთეულები: $1 \text{ მკ} = 10^{-3} \text{ კ}, 1 \text{ მკკ} = 10^{-6} \text{ კ}, 1 \text{ ნკ} = 10^{-9} \text{ კ}.$

ნერტილოვანი მუხტი ანუ ნერტილოვანი დამუხტული სხეული ბუნებაში არ არსებობს. ასეთად შეიძლება მივიჩნიოთ სფერული ფორმის თანაბრად დამუხტული სხეული ან სხეული, რომლის ზომა გაცილებით ნაკლებია სხვა დამუხტულ სხეულამდე მანძილთან შედარებით.

უნდა აღინიშნოს, რომ უძრავი ნერტილოვანი მუხტების ურთიერთქმედების ძალები მიმართულია ამ ნერტილების შემაერთებელი წრფის გასწვრივ და მათი თავმოყრა შეიძლება სივრცის ერთ ნერტილში – ასეთი თვისების ძალებს **ცენტრალური ძალები** ეწოდება. ამრიგად, **კულონური ძალები ცენტრალური ძალებია. ცენტრალურია აგრეთვე გრავიტაციული ძალებიც.**

კულონური ძალისათვის სამართლიანია ნიუტონის III კანონი.

75. ელექტრული ველის დაძაბულობა

დამუხტული სხეულები ერთმანეთთან შეუხებლად, რაიმე მანძილზე ურთიერთქმედებენ ძალით, რომელსაც **ელექტრული ძალა** ეწოდება.

გარემოს, რომელშიც ვლინდება მუხტზე ელექტრული ძალის მოქმედება, ელექტრული ველი ეწოდება.

ელექტრულ ველს ახასიათებენ ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც **ელექტრული ველის დაძაბულობა** ეწოდება. დაძაბულობა არის ველის ძალური მახასიათებელი.

დადებითი q მუხტის მიერ შექმნილი ელექტროსტატიკური ველი მის ნებისმიერ წერტილში ხასიათდება ამ წერტილში შეტანილ ე. წ. სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალით. სასინჯი მუხტის სიდიდე ისეთი მცირე უნდა იყოს, რომ მისმა შეტანამ არ შეცვალოს გამოსაკვლევი ველის სიდიდე და მიმართულება. სასინჯ მუხტად ყოველთვის დადებით მუხტს იღებენ. კულონის კანონის თანახმად განზიდვის ძალა, რომელიც მოქმედებს q მუხტსა და სასინჯ q_0 მუხტს შორის, მოდულით ტოლია:

$$|\vec{F}| = k \frac{|q| \cdot |q_0|}{r^2}. \quad (1)$$

ფორმულიდან ჩანს, რომ F ძალის სიდიდე დამოკიდებულია არა მხოლოდ q -ზე, არამედ სასინჯ q_0 მუხტზეც.

ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობა ვექტორული სიდიდეა, რომელიც ტოლია ველის გარკვეულ წერტილში მოთავსებულ დადებით სასინჯ მუხტზე ველის მხრიდან მოქმედი ძალის შეფარდების ამ მუხტის სიდიდესთან:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0}. \quad (2)$$

თუ (1) გამოსახულებიდან (2)-ში ჩავსვამთ F -ის მნიშვნელობას, მივიღებთ q წერტილოვანი მუხტის ველის დაძაბულობის მოდულის მნიშვნელობას q მუხტისგან r მანძილზე:

$$E = k \frac{q}{r^2}.$$

$\frac{\vec{F}}{q_0}$ ფარდობა არ არის დამოკიდებული $\vec{F}$ ძალისა და სასინჯი q_0 მუხტის სიდიდეზე. დამოკიდებულია მხოლოდ ველის წარმომქმნელ მუხტსა და ამ მუხტამდე მანძილზე, ამიტომ ასეთი შეფარდება წარმოადგენს ველის დამახასიათებელ სიდიდეს. ელექტრული ველის დაძაბულობა ვექტორული სიდიდეა.

SI სისტემაში დაძაბულობის ერთეულია ნ/კ. შემდგომში, ველის ენერგეტიკული მახასიათებლის – პოტენციალის შესწავლისას გავიგებთ, რომ დაძაბულობის ერთეულია 1 ვ/მ (ვოლტი/მეტრზე).

ცნობილია რომ, თუ სხეულზე ერთდროულად რამდენიმე ძალა მოქმედებს $\vec{F}_1, \vec{F}_2, \dots, \vec{F}_n$, მაშინ ამ ძალების მოქმედება შეიძლება შეიცვალოს ერთი – ტოლქმედი ძალით:

$$\vec{F} = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n.$$

რამდენიმე ძალის მოქმედებით სხეული ისე იქცევა, თითქოს მასზე მოქმედებდეს ერთი $\vec{F}$ ტოლქმედი ძალა. ამაში მდგომარეობს ძალების სუპერპოზიციის პრინციპი. ცხადია, რომ ამავე პრინციპს ემორჩილება სასინჯ მუხტზე სხვა მუხტების მხრიდან მოქმედი ძალები. თუ ძალების სუპერპოზიციის შესაბამის განტოლებას გავყოფთ სასინჯი მუხტის q_0 სიდიდეზე, მივიღებთ ელექტროსტატიკური ველების დაძაბულობისათვის სუპერპოზიციის პრინციპის პირობას:

თუ სივრცის რომელიმე წერტილში სხვადასხვა ელექტრული მუხტი ქმნის ელექტრულ ველს, რომლის დაძაბულობაა $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \dots, \vec{E}_n$, მაშინ ამ წერტილში ელექტრული ველის დაძაბულობა ცალკეული მუხტის მიერ შექმნილი ველის დაძაბულობათა გეომეტრიული ჯამის ტოლია:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n.$$

სუპერპოზიციის პრინციპი სამართლიანია ელექტროსტატიკური ველისათვის.

76. ელექტრული ველის ძალწირები

ველის დაძაბულობას გამოსახავენ სიდიდისა და მიმართულების მაჩვენებელი წირების – ძალწირების მეშვეობით.

ელექტრული ველის ძალწირი ეწოდება წირს, რომლის თითოეულ წერტილში გავლებულ მხებს ველის დაძაბულობის ვექტორის მიმართულება აქვს.

ძალწირების მართობულად ორიენტირებულ ფართობის ერთეულზე გამავალი ძალწირების რიცხვი იმ ადგილას ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის სიდიდის პროპორციულია.

დადებითი წერტილოვანი მუხტის ველის ძალწირები დადებითი მუხტიდან მიმართულია რადიუსის გასწვრივ გარეთ (სურ. 68 ა), ხოლო უარყოფით მუხტის ველის ძალწირები რადიუსის გასწვრივ მიმართულია უარყოფითი მუხტისკენ (სურ. 68 ბ). აღნიშნული მიმართულებები ემთხვევა დადებით სასინჯ მუხტზე მოქმედი ძალის მიმართულებას.

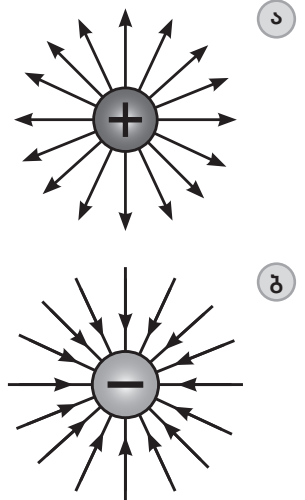
69-ე, ა და ბ სურათზე გამოსახულია ორი მუხტის ველის ძალწირები – როგორც სხვადასხვა ნიშნიანი, ასევე ერთნაირნიშნიანი მუხტებისათვის. ძალწირები მრუდ წირებს წარმოადგენს, რომლის ნებისმიერ წერტილში ველის დაძაბულობა ორივე მუხტის ველების სუპერპოზიციით მიიღება.

ველს, რომლის ყველა წერტილში დაძაბულობას ერთნაირი სიდიდე და მიმართულება აქვს ერთგვაროვანი ველი ეწოდება.

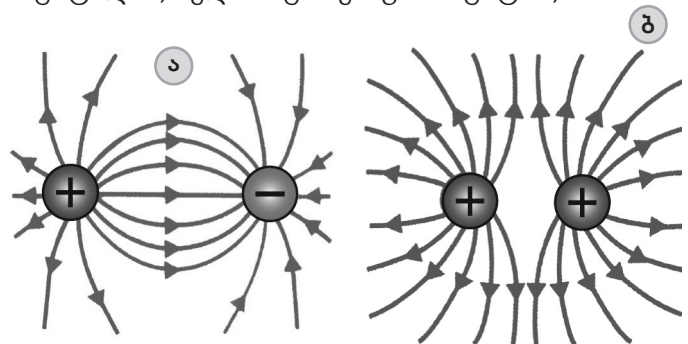
ველის დაძაბულობის ძალწირები ერთმანეთთან არსად გადაიკვეთება, რადგან მათი გადაკვეთა მიგვანიშნებდა, რომ ერთსა და იმავე წერტილში დაძაბულობას ორი სხვადასხვა მიმართულება აქვს, რაც შეუძლებელია.

ამგვარად:

- ძალწირები გამოდიან დადებითი მუხტიდან, შედიან უარყოფით მუხტში;
- ელექტრული ველის ძალწირები გვიჩვენებენ ელექტრული ველის დაძაბულობის ვექტორის მიმართულებას;
- ძალწირების მართობულ ერთეულოვან ფართობში გამავალი ძალწირების რაოდენობა პროპორციულია ელექტრული ველის დაძაბულობის.



სურ. 68



სურ. 69

77. დიელექტრიკული შეღწევადობა

დიელექტრიკების ელექტრულ ველში მოთავსებისას ელექტროსტატიკური ველი მათში სუსტდება ვაკუუმში ველთან შედარებით. ველის დასუსტების ხარისხი დამოკიდებულია თვით დიელექტრიკის თვისებებზე. დიელექტრიკების ელექტრული თვისებების დასახასიათებლად შემოაქვთ ფიზიკური სიდიდე – დიელექტრიკული შეღწევადობა. **დიელექტრიკული შეღწევადობა გვიჩვენებს, რამდენჯერ ნაკლებია ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის მოდული დიელექტრიკის შიგნით ვაკუუმში ელექტროსტატიკური ველის დაძაბულობის მოდულთან შედარებით.**

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

ε -ის სიდიდე განყენებული რიცხვია და $\varepsilon > 1$. ვაკუუმისთვის $\varepsilon = 1$, ასევე ჰაერისთვის შეიძლება მივიჩნიოთ ერთის ტოლად.

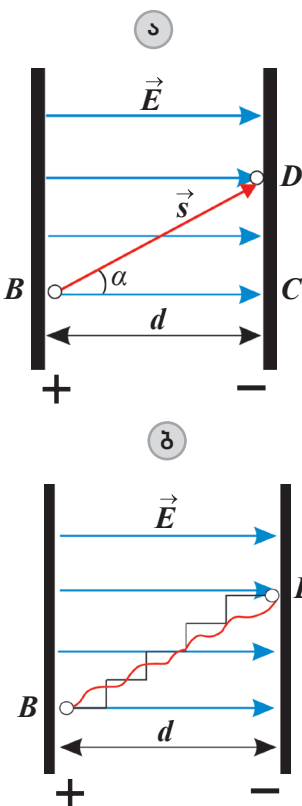
თუ წერტილოვანი მუხტი მოთავსებულია ε დიელექტრიკული შეღწევადობის დიელექტრიკში, რომლის ველის დაძაბულობაა E , მაშინ

$$E = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \cdot \frac{q}{r^2} = \frac{kq}{\varepsilon r^2}.$$

მუხტებს შორის კულონური ურთიერთქმედების ძალა:

$$F = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon} \cdot \frac{|q_1| \cdot |q_2|}{r^2} = \frac{k|q_1| |q_2|}{\varepsilon r^2},$$

სადაც $k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{ნმ}^2}{\text{კ}^2}.$



სურ. 70

78. ელექტროსტატიკური ველის მუშაობა

განვიხილოთ E დაძაბულობის ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში დადებითი q მუხტის გადაადგილება B -დან D წერტილში ძალწირებისადმი α კუთხით (სურ. 70 ა). ამ შემთხვევაში ელექტროსტატიკური ველის მიერ მუხტის გადაადგილებაზე შესრულებული მუშაობა ტოლია:

$A = F \cos \alpha = qE \cos \alpha = qEd$, სადაც d – ფირფიტებს შორის მანძილია, ხოლო s – BD გადაადგილების სიგრძე.

თუ მუხტი B წერტილიდან ჯერ მოძრაობდა ველის გასწვრივ C წერტილისკენ და ფირფიტის გასწვრივ გადაადგილების შემდეგ აღმოჩნდა D წერტილში, ველის მუშაობა ტოლი იქნება:

$$A_{\text{ელ}} = A_1 + A_2 = qE \cdot BC \cos 0^\circ + qE \cdot CD \cos 90^\circ = qEd.$$

ერთგვაროვან ელექტროსტატიკურ ველში მუხტის გადაადგილებისას შესრულებული მუშაობები BD და BCD ტრაექტორიების გასწვრივ ერთი და იგივეა. იმავე შედეგს მივიღებთ მუხტის გადაადგილებისას ნებისმიერი მრუდი წირის გასწვრივ იმავე B -დან D წერტილამდე, თუ ამ მრუდს მცირე ზომის საფეხურებად დავყოფთ (სურ. 70 ბ).

გადაადგილების მიმართულების შეცვლისას ელექტრული ველის მუშაობა იცვლის ნიშანს საწინააღმდეგოთი: თუ q მუხტის B -დან D წერტილში გადაადგილებისას ველის ძალებმა შეასრულეს A მუშაობა, იგივე ძალები D -დან B წერტილში იმავე გზით გადაადგილებისას A მუშაობას შეასრულებს უარყოფითი ნიშნით. რადგან მუშაობა ტრაექტორიის ფორმაზე არ არის დამოკიდებული, ამიტომ ამ წერტილებს შორის ნებისმიერი სხვა ტრაექტორიის გასწვრივ გადაადგილების შემთხვევაშიც იგივე A მუშაობა შესრულდება. ამგვარად, **ჩაკეტილ ტრაექტორიაზე ელექტროსტატიკური ველის მიერ მუხტის გადაადგილებაზე შესრულებული ჯამური მუშაობა ნულის ტოლია.**

ველს, რომელშიც ნებისმიერი ჩაკეტილი ტრაექტორიის გასწვრივ გადაადგილებისას შესრულებული მუშაობა ნულის ტოლია, **პოტენციური ველი** ეწოდება.

გრაფიტაციული და ელექტროსტატიკური ველები პოტენციური ველებია.

79. ელექტროსტატიკური ველის პოტენციალი

ელექტროსტატიკური ველის მოცემული წერტილის პოტენციალი ეწოდება ამ წერტილში მოთავსებული სასინჯი დადებითი მუხტის პოტენციური ენერგიის შეფარდებას ამ მუხტის სიდიდესთან:

$$\varphi = \frac{W}{q_0}. \quad (1)$$

სადაც W მოცემულ წერტილში ველსა და სასინჯ q_0 მუხტს შორის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგიაა. პოტენციალის ერთეულს ეწოდა **1 ვოლტი** (შემოკლებით **ვ**) იტალიელი ფიზიკოსის **ალესანდრო ვოლტას** პატივსაცემად.

$$1\text{ვ} = 1\text{ჯ/კ}.$$

ერთი ვოლტი ველის იმ წერტილის პოტენციალია, სადაც ერთი კულონი მუხტის შეტანისას ამ მუხტის პოტენციური ენერგია ერთი ჯოულის ტოლია.

პოტენციალი სკალარული სიდიდეა და ველის ენერგეტიკული მახასიათებელია. იგი ველის მოცემულ წერტილში მუხტის პოტენციური ენერგიის განმსაზღვრელია.

თუ (1) ფორმულაში შევიტანთ წერტილოვან q მუხტსა და მის ველში შეტანილ სასინჯ q_0 მუხტს შორის ურთიერთქმედების პოტენციური ენერგიის ფორმულას:

$$W = k \frac{q \cdot q_0}{r}.$$

მივიღებთ, რომ წერტილოვანი მუხტის პოტენციალი:

$$\varphi = k \frac{q}{r}. \quad (2)$$

ეს ფორმულა გამოიყენება დამუხტული გამტარი სფეროს ზედაპირზე ან მის გარეთ პოტენციალის გამოსათვლელად.

მე-(2) ფორმულიდან ჩანს, რომ ერთი და იმავე მუხტის არსებობისას მეტი პოტენციალი ექნება იმ სფეროს, რომლის რადიუსი ნაკლებია.

ერთგვაროვანი ელექტრული ველის პოტენციალის ფორმულის მისაღებად გავიხსენოთ ასეთ ველში დადებითი q_0 მუხტის პოტენციური ენერგიის ფორმულა: $W = qEd$ და შევიტანოთ (1) ფორმულაში. მივიღებთ ერთგვაროვანი ელექტრული ველის პოტენციალის ფორმულას ნულოვანი ენერგიის დონის მიმართ:

$$\varphi = Ed. \quad (3)$$

სადაც d არის მუხტის მდებარეობა წინასწარ არჩეული პოტენციური ენერგიის ნულოვანი დონის მიმართ. ერთგვაროვან ველში ასეთ დონეს წარმოადგენს უარყოფითად დამუხტული ფირფიტა, რადგან დადებითი მუხტი ამ ფირფიტისკენ მოძრაობს. პრაქტიკაში, როგორც წესი, სხვადასხვა წერტილების პოტენციალს განიხილავენ დედამიწის მიმართ, რომლის პოტენციალი ნულის ტოლად მიიჩნევა.

80. პოტენციალთა სხვაობა

ელექტრული ველის რომელიმე წერტილიდან სხვა წერტილში მუხტის გადატანაზე შესრულებული მუშაობა ტოლია:

$$A = W_1 - W_2.$$

სადაც W_1 და W_2 ველის შესაბამის წერტილებში q მუხტის პოტენციური ენერგიებია.

ვიცით, რომ W_1 და W_2 გამოითვლება ფორმულით: $W_1 = q\varphi_1$, $W_2 = q\varphi_2$. ამ გამოსახულებების მუშაობის ფორმულაში ჩასმით მივიღებთ:

$$A = q\varphi_1 - q\varphi_2 = q(\varphi_1 - \varphi_2). \quad (1)$$

სიდიდეს $\varphi_1 - \varphi_2$ პოტენციალთა სხვაობა ეწოდება. φ_1 და φ_2 ველის მოცემული წერტილების პოტენციალებია. პოტენციალთა სხვაობას აგრეთვე ელექტრულ ძაბვას უწოდებენ და U ასოთი აღნიშნავენ.

ე. ი. თუ $U = \varphi_1 - \varphi_2$, მაშინ:
$$U = \frac{A}{q}.$$

პრაქტიკაში გამოყენება აქვს არა პოტენციალს, არამედ პოტენციალთა სხვაობას, რომელიც არ არის დამოკიდებული პოტენციალის ნულოვანი დონის არჩევაზე.

ამგვარად, **ელექტრული ველის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა (ძაბვა) ტოლია ამ წერტილებს შორის მუხტის გადატანაზე ველის მიერ შესრულებული მუშაობის შეფარდებისა ამ მუხტის სიდიდესთან.**

პოტენციალთა სხვაობის ერთეული არის 1 ვოლტი.

ველის ორ წერტილს შორის პოტენციალთა სხვაობა ერთი ვოლტის ტოლია, თუ ამ წერტილებს შორის ერთი კულონი მუხტის გადატანაზე სრულდება ერთი ჯოული მუშაობა.

პარაგრაფი 79, (3) ფორმულიდან შეიძლება დავადგინოთ ელექტრული ველის დაძაბულობის ერთეული, რადგან $\varphi = Ed$, $E = \frac{\varphi}{d}$, აქედან, ველის დაძაბულობის ერთეულია – 1 ვ/მ.

81. ელექტროტევადობა. ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა

ნებისმიერი ფორმის გამტარის მუხტის სიდიდის შეფარდება ამავე გამტარის პოტენციალთან მოცემული გამტარისთვის მუდმივი სიდიდეა და მას გამტარის **ელექტროტევადობა** ეწოდება:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

ელექტროტევადობის ერთეულია ფარადი (შემოკლებით ფ): 1 ფ = 1 კ/ვ.

ფარადი არის ისეთი სხეულის ელექტროტევადობა, რომელზეც ერთი კულონი მუხტის გადაცემა მის პოტენციალს ერთი ვოლტით ზრდის.

თუ ტევადობის ფორმულაში φ -ის ნაცვლად შევიტანთ $k\frac{q}{r}$ -ს, მივიღებთ:

$$C = \frac{r}{k}.$$

თუ ფორმულაში შევიტანთ k -ს მნიშვნელობას, მივიღებთ $C = 4\pi\epsilon_0\epsilon r$.

სფეროს ელექტროტევადობა არ არის დამოკიდებული მუხტის სიდიდეზე და სფეროს რადიუსის პირდაპირპროპორციულია.

1 ფარადი დიდი ტევადობაა. ასეთი ტევადობა რომ ჰქონდეს სხვა სხეულებიდან განცალკევებულ სფეროს, მისი რადიუსი 13-ჯერ მეტი უნდა იყოს მზის რადიუსზე. ამიტომ პრაქტიკაში გამოიყენება ტევადობის წილადი ერთეულები: 1 მკფ (მიკროფარადი) = 10^{-6} ფ; 1 ნფ (ნანოფარადი) = 10^{-9} ფ, 1 პფ (პიკოფარადი) = 10^{-12} ფ.

ბრტყელი კონდენსატორი წარმოადგენს ორ ბრტყელ გამტარ პარალელურ სიბრტყეს, რომელთა შორის არის ჰაერის ან დიელექტრიკის თხელი ფენა.

როდესაც ფირფიტებს შორის ε შეღწევადობის დიელექტრიკია მოთავსებული, ბრტყელ ფირფიტებიანი კონდენსატორის ველის დაძაბულობა ε -ჯერ შემცირდება და შემდეგი ფორმულით გამოისახება:

$$E = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0 S}.$$

კონდენსატორის ტევადობა $C = \frac{q}{U}$, სადაც q არის მუხტი ერთ-ერთ ფირფიტაზე (შემონაფენზე), ხოლო U – კონდენსატორზე მოდებული ძაბვა.

ასეთი კონდენსატორის ფირფიტებს შორის ძაბვა ტოლია:

$$U = Ed, \quad U = \frac{q \cdot d}{\varepsilon \varepsilon_0 S}.$$

თუ ამ გამოსახულებას ელექტროტევადობის ფორმულაში ჩავსვამთ, მივიღებთ ბრტყელი კონდენსატორის ტევადობის გამოსათვლელ ფორმულას:

$$C = \frac{q}{U} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 S}{d}.$$

ეს ფორმულა გვიჩვენებს, რომ ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობა დამოკიდებულია ფირფიტების ფართობზე, მათ შორის მანძილზე და გარემოს ელექტრულ თვისებებზე. რაც მეტია ფართობი, მით მეტი რაოდენობის მუხტები განთავსდება ფირფიტების ზედაპირზე და რაც უფრო მცირეა ფირფიტებს შორის მანძილი მით უფრო მეტი ძალით აკავებს ერთ ფირფიტაზე არსებული მუხტი მეორე ფირფიტაზე არსებულ მუხტს, რაც ზრდის ელექტროტევადობას. დამუხტულ ფირფიტებს შორის დიელექტრიკის შეტანით პოლარიზაციის გამო წარმოქმნილი ბმული მუხტები იწვევს ფირფიტებზე დამატებითი მუხტების მოზიდვას მუხტების წყაროდან, რაც ასევე ზრდის ელექტროტევადობას.

82. კონდენსატორის ენერგია

თუ დიდი ელექტროტევადობის კონდენსატორს შეუერთებთ ნათურას, ის ცოტა ხნით აინთება იმ ელექტრული ენერგიის ხარჯზე, რომელიც დაგროვდა კონდენსატორზე მისი დენის წყაროსთან მიერთებისას. თუ C ელექტროტევადობის კონდენსატორის შემონაფენებზე განლაგებულია $+q$ და $-q$ მუხტები, მაშინ შემონაფენებს შორის ძაბვა

$$U = \frac{q}{C}.$$

განმუხტვის პროცესში კონდენსატორის შემონაფენებზე მუხტის შემცირებისას ძაბვა სწრაფად მცირდება U -დან ნულამდე, რის გამოც კონდენსატორთან მიერთებული ნათურა ქრება. განმუხტვისას კონდენსატორზე ძაბვის საშუალო მნიშვნელობა ტოლია:

$$U_{\text{საშ}} = \frac{U+0}{2} = \frac{U}{2} = \frac{q}{2C}.$$

კონდენსატორის განმუხტვის დროს ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა შემდეგნაირად გამოისახება:

$$A = qU_{\text{საშ}} = \frac{q^2}{2C}$$

ან, თუ გავითვალისწინებთ, რომ $q = CU$, მაშინ $A = \frac{CU^2}{2}$.

ვიცით, რომ ელექტრული ველის მიერ შესრულებული მუშაობა ტოლია ელექტრული ველის ენერგიის ცვლილებისა. კონდენსატორის განმუხტვისას:

$$A = W_1 - W_2 = W_1 - 0 = W.$$

ამიტომ, **ელექტრული ველის ენერგია** გამოისახება ანალოგიური ფორმულით:

$$W = A = \frac{q^2}{2C} = \frac{CU^2}{2}.$$

თუ C -ს ნაცვლად შევიტანთ ბრტყელი კონდენსატორის ელექტროტევადობის გამოსათვლელ ფორმულას,

$$C = \frac{\epsilon\epsilon_0 S}{d}.$$

მივიღებთ: $W = \frac{\epsilon\epsilon_0 S U^2}{2d}$. მაგრამ, $U = Ed$, ამიტომ $W = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2} Sd$.

თუ ამ ფორმულის ორივე მხარეს გავყოფთ კონდენსატორის ფირფიტებს შორის ელექტრული ველის მიერ დაკავებულ მოცულობაზე $V = Sd$, მივიღებთ ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივის (ω) ფორმულას:

$$\omega = \frac{W}{V} = \frac{\epsilon\epsilon_0 E^2}{2}.$$

ენერგიის სიმკვრივის ერთეულია ჯოული კუბურ მეტრზე – ჯ/მ^3 . ე. ი., **ელექტრული ველის ენერგიის სიმკვრივე ამ ველის დაძაბულობის კვადრატის პროპორციულია.**

ეს დებულება სამართლიანია არა მარტო ერთგვაროვანი, არამედ ნებისმიერი სახის ელექტრული ველისთვის.

83. დენის ძალა

ელექტრული დენი ეწოდება დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებულ, მიმართულ მოძრაობას.

ელექტრული დენი ლითონებში თავისუფალი ელექტრონების მიმართული მოძრაობაა. სითხეებში – დადებითი და უარყოფითი იონების მიმართული მოძრაობა, აირებში კი – ელექტრონების, დადებითი და უარყოფითი იონების მიმართული მოძრაობა. **ელექტრული დენის მიმართულებად მიჩნეულია დადებითი მუხტების მოძრაობის მიმართულება.**

ელექტრული ველი გამტარში სინათლის სიჩქარით ვრცელდება. ელექტრული დენი რაოდენობრივად ხასიათდება ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც დენის ძალა ეწოდება.

დენის ძალა (I) ტოლია გამტარის განივკვეთში გამავალი მუხტის სიდიდის (q) ფარდობისა დროს შუალედთან (t), რომლის განმავლობაშიც ეს მუხტი გადიოდა:

$$I = \frac{q}{t}.$$

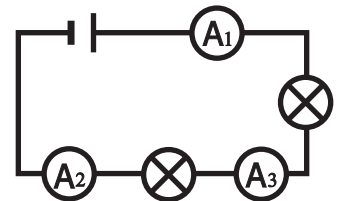
ისეთ დენს, რომელიც არ იცვლის მიმართულებას და სიდიდეს, **მუდმივი დენი** ეწოდება. SI სისტემაში დენის ძალის ერთეულია **1 ამპერი**. ერთი ამპერი არის ისეთი დენის ძალა, როდესაც გამტარის განივკვეთში ერთ წამში ერთი კულონი მუხტი გადის:

$$1 \text{ ა} = 1 \frac{\text{კ}}{\text{წმ}}$$

დენის ძალა იზომება სპეციალური ხელსაწყოთი, რომელსაც **ამპერმეტრი** ეწოდება. ელექტრულ წრედში ამპერმეტრი **მიმდევრობით** ირთვება (სურ. 71). მისი წინაღობა უნდა იყოს რაც შეიძლება მცირე, რომ წრედში დენის ძალის მნიშვნელობა არ შეცვალოს.

დავუშვათ, გამტარის განივკვეთის ფართობია S , დამუხტული ნაწილაკების მოწესრიგებული მოძრაობის საშუალო სიჩქარე – v , ნაწილაკების კონცენტრაცია n , დენის გადამტანი ნაწილაკის მუხტი q , მაშინ გამტარში გამავალი დენი გამოი-სახება ფორმულით:

$$I = nqSv.$$

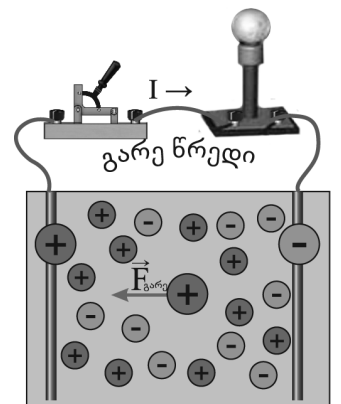


სურ. 71

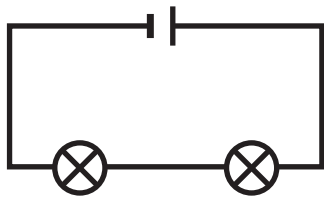
84. დენის წყაროები

ელექტრული დენის არსებობის აუცილებელი პირობაა თავისუფალი მუხტებისა და ელექტრული ველის არსებობა, რომელიც მოქმედებს ამ მუხტებზე და იწვევს მათ მიმართულ მოძრაობას. დენის მისაღებად ელექტრულ ველს ქმნის დენის წყარო. მუდმივ დენს მუდმივი დენის წყარო ქმნის (სურ. 72).

არსებობს სხვადასხვაგვარი მუდმივი დენის წყარო: გალვანური ელემენტი, აკუმულატორი, მზის ელემენტი, თერმოელემენტი და სხვა. მუდმივი დენის წყაროს ორი პოლუსი აქვს: დადებითი და უარყოფითი. ნებისმიერ დენის წყაროში არაელექტრული ბუნების (ქიმიური, სინათლის, სითბური და სხვ.) ძალების მოქმედებით ხდება მუხტების განცალკევება და მათი დაგროვება დენის წყაროს პოლუსებზე.



სურ. 72



სურ. 73

არაელექტრული ბუნების ძალებს გარე ძალებსაც უწოდებენ. თუ დენის წყაროს პოლუსებს გამტარებით შევაერთებთ ნათურასთან, მაშინ ელექტრული ველის გავლენით თავისუფალი დამუხტული ნაწილაკები ამოძრავდებიან ერთი გარკვეული მიმართულებით, ანუ აღიძვრება ელექტრული დენი. ელექტრული დენის წყარო და მასთან შეერთებული ელექტრული ხელსაწყოები ქმნიან ელექტრულ წრედს. ელექტრული წრედი შეიძლება გამოისახოს სქემის სახით (სურ. 73).

თუ წრედი ჩაკეტილი არ არის, მასში დენი არ გაივლის.

74-ე სურათზე გამოსახულია ზოგიერთი ელექტრული ხელსაწყოს სქემატური აღნიშვნა.

ელექტრული ხელსაწყოების სქემატური აღნიშვნა				
ნათურა	დენის წყარო	ჩამრთველი	ელექტროზარი	დნობადი დამცველი
წინაღობა	ელექტროძრავა	რეოსტატი	მომჭერები	კოჭა გულარით

სურ. 74

85. დენის მოქმედებები

ელექტრული დენის გავლა იწვევს გამტარების გათბობას. **დენის სითბური მოქმედება** ზოგჯერ ისეთი ძლიერია, რომ გამტარი ვარვარებს და კაშკაშს იწყებს. მაგალითად, ნათურაში დენის გავლისას ვოლფრამის ძაფი კაშკაშებს.

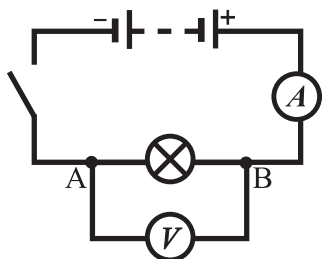
სითხეებში: მჟავას, მარილისა და ტუტეების წყალხსნარებში (ელექტროლიტებში) დენის გავლის შემდეგ, **დენის ქიმიური მოქმედება** მჟღავნდება.

ელექტროლიტებში დენის გავლისას ელექტროდებზე ნივთიერება გამოიყოფა.

დენიანი გამტარი თავის გარშემო ქმნის მაგნიტურ ველს. ამას ადასტურებს დენიანი გამტართან მიახლოებული მაგნიტური ისრის მიმართულების ცვლილება. ე. ი. ელექტრულ დენს ახასიათებს მაგნიტური მოქმედება.

86. ძაბვა

დენის წყაროს მიერ შექმნილი ელექტრული ველის გავლენით მუხტები გადაადგილდება წრედის უბნის ერთი წერტილიდან მეორეში (მაგ. A-დან B-ში, სურ. 75). ე.ი. ელექტრული ველი მუხტის გადაადგილებისას ასრულებს მუშაობას. მუშაობის შესასრულებლად კი აუცილებელია ელექტრულ ველს გააჩნდეს ენერგია. ელექტრული ველის ენერგეტიკული მახასიათებელი არის **ელექტრული ძაბვა** ან უბრალოდ ძაბვა. ძაბვა (U) არის ფიზიკური სიდიდე, რომელიც გამოითვლება ელექტრული ველის მიერ წრედის A წერტილიდან B წერტილში მუხტის გადაადგილებისას შესრულებული მუშაობის (A) შეფარდებით ამ მუხტის სიდიდესთან (q):



სურ. 75

$$U = \frac{A}{q}.$$

SI სისტემაში ძაბვის ერთეულია **1 ვოლტი (ვ)**.

ძაბვის გასაზომად იყენებენ სპეციალურ ხელსაწყოს – ვოლტმეტრს. მუდმივი დენის ამპერმეტრის მსგავსად მუდმივი დენის ვოლტმეტრის ერთ-ერთ მომჭერზე აღნიშნულია „+“ ნიშანი. ეს მომჭერი წრედში ჩართვისას აუცილებლად მუდმივი დენის წყაროს დადებით პოლუსთან უნდა იყოს შეერთებული. წინააღმდეგ შემთხვევაში ისარი საპირისპირო მხარეს გადაიხრება, რაც ხშირად ხელსაწყოს დაზიანებას იწვევს.

ვოლტმეტრი ამპერმეტრისგან განსხვავებით წრედში პარალელურად ირთვება იმ უბანზე, სადაც უშუალოდ ძაბვის გაზომვა სჭირდებათ. მაგალითად, ნათურაზე ძაბვის გასაზომად მას უშუალოდ ნათურის მომჭერებს უერთებენ (სურ. 75).

87. გამტარის წინაღობა. კუთრი წინაღობა

ცნობილია, რომ სხვადასხვა კრისტალური ნივთიერება განსხვავებული ელექტრული თვისებებით ხასიათდება. ზოგიერთი მათგანი დენს კარგად ატარებს, ზოგიერთი კი ცუდად. ეს განპირობებულია იმით, რომ გამტარში ელექტრული ველის გავლენით მოწესრიგებულად მოძრავი ელექტრონები ურთიერთქმედებენ კვანძებში მყოფ იონებთან. ამ ურთიერთქმედების გამო ველის გასწვრივ მოძრავი თავისუფალი ელექტრონები განიბნევა. მათი სიჩქარე და ენერგია მცირდება. ე. ი. მცირდება გამტარში დროის ერთეულში გამავალი მუხტის რაოდენობა ანუ მცირდება ელექტრული დენის ძალა. ე. ი. გამტარებს აქვთ თვისება წინააღმდეგობა გაუწიონ მასში გამავალ დენს. გამტარის ამ თვისებას **ელექტრულ წინაღობას** უწოდებენ.

ელექტრული წინაღობა ფიზიკური სიდიდეა. იგი აღინიშნება R ასოთი. მისი ერთეულია **1 ომი**. წინაღობის ერთეულს 1 ომი ეწოდა გერმანელი ფიზიკოსის გეორგ სიმონ ომის პატივსაცემად. **ერთი ომი არის ისეთი გამტარის წინაღობა, რომლის ბოლოებზე ერთი ვოლტი ძაბვისას მასში გამავალი დენის ძალა ერთი ამპერია.**

გამტარის წინაღობა დამოკიდებულია ნივთიერების გვარობასა და მის გეომეტრიულ ზომებზე. გამტარის წინაღობის დამოკიდებულება ნივთიერების გვარობაზე ხასიათდება ფიზიკური სიდიდით, რომელსაც **კუთრი წინაღობა** ეწოდება. აღინიშნება ρ ასოთი. კუთრი წინაღობა გამოითვლება ფორმულით:

$$\rho = \frac{R \cdot S}{l}.$$

აქედან,
$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

გამტარის წინაღობა პირდაპირპროპორციულია გამტარის სიგრძისა, უკუპროპორციულია ამ გამტარის განივკვეთის ფართობისა და დამოკიდებულია გამტარის ნივთიერების გვარობაზე.

კუთრი წინაღობის ერთეული SI სისტემაში არის ომი • მ. ხოლო სისტემგარეშე ერთეულია **ომი • მმ²**.

მ
რიცხოვნოდ, გარკვეული ნივთიერების კუთრი წინაღობა ამ ნივთიერების ისეთი გამტარის წინაღობაა, რომლის სიგრძეა 1 მ და განივკვეთის ფართობია 1 მმ². ყველა ნივთიერება ხასიათდება კუთრი წინაღობით, რომელთა მნიშვნელობები მოცემულია სპეციალურ ცხრილში.

ლითონის გამტარების კუთრი წინაღობა ტემპერატურის გაზრდით იზრდება, არაგამტარებისა და სითხეების წინაღობა კი ტემპერატურის გაზრდით მცირდება.

88. ომის კანონი წრედის უბნისათვის

გეორგ ომმა 1826 წელს ექსპერიმენტულად დაადგინა დამოკიდებულება დენის ძალას, ძაბვასა და წინააღობას შორის.

ამ სიდიდეებს შორის დამოკიდებულებამ ომის კანონის სახელწოდება მიიღო.

წრედის უბანზე დენის ძალა (I) პირდაპირპროპორციულია ამ უბანზე ძაბვისა (U) და უკუპროპორციულია ამ უბნის წინააღობისა (R):

$$I = \frac{U}{R}.$$

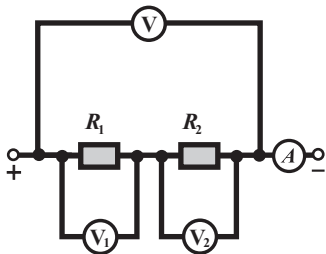
აქედან,

$$U = IR; \quad R = \frac{U}{I}.$$

ამ ფორმულის მიხედვით: $1 \text{ ომი} = 1 \frac{\text{ვ}}{\text{ა}}.$

89. გამტარების მიმდევრობითი შეერთება

არსებობს ელექტრული ხელსაწყოების შეერთების ორი ხერხი: **მიმდევრობითი და პარალელური.**



სურ. 76

მიმდევრობითი შეერთებისას წრედის ერთი ელემენტის ბოლო უერთდება მეორე ელემენტის დასაწყისს და ა.შ.

გამტარების მიმდევრობითი შეერთებისას (სურ. 76) დენის ძალა წრედში ყველგან ერთი და იგივეა. ეს რომ ასე არ იყოს, მუხტები დაგროვდებოდა წრედის რომელიმე წერტილში.

$$I = I_1 = I_2.$$

ძაბვა მთელ წრედში თითოეულ უბანზე ძაბვათა ჯამის ტოლია:

$$U = U_1 + U_2. \quad (1)$$

თუ გამტარის წინააღობები თითოეულ უბანზე შესაბამისად R_1 და R_2 -ის ტოლია, მთელი წრედის წინააღობა კი – R , მაშინ ომის კანონის თანახმად:

$$U = IR; \quad U_1 = IR_1; \quad U_2 = IR_2. \quad (2)$$

(1) ფორმულაში მე-(2) ფორმულების შეტანით მიიღება:

$$IR = IR_1 + IR_2, \quad \text{ანუ} \quad R = R_1 + R_2.$$

მიმდევრობითი შეერთებისას წრედის სრული წინააღობა ტოლია თითოეული გამტარის წინააღობათა ჯამისა.

თუ U_1 -ს გავყოფთ U_2 -ზე, მივიღებთ: $\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$

ძაბვა მიმდევრობით შეერთებულ გამტარებზე მათი წინააღობების პროპორციულად ნაწილდება.

თუ წრედი შედგება რამდენიმე მიმდევრობით შეერთებული გამტარისაგან, რომელთა წინააღობა შესაბამისად არის $R_1, R_2, \dots, R_n$, მაშინ საერთო წინააღობა იქნება:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n.$$

თუ $R_1 = R_2 = \dots = R_n = r$, მაშინ $R = n \cdot r$.

90. გამტართა პარალელური შეერთება

პარალელური შეერთებისას წრედში ჩართული ყველა ელემენტის ერთი ბოლო თავს იყრის ერთ წერტილში (A), ხოლო მეორე ბოლო – მეორე (B) წერტილში (სურ. 77).

გამტარების პარალელური შეერთებისას ძაბვა წრედის ამ უბანზე და გამტარების ბოლოებზე ერთნაირია:

$$U = U_1 = U_2$$

დენის ძალა წრედის ამ უბანზე ტოლია წრედის პარალელურად შეერთებულ თითოეულ გამტარში გამავალი დენის ძალების ჯამისა (სურ. 77).

$$I = I_1 + I_2 \quad (3)$$

თუ გამტარის წინააღობებია შესაბამისად R_1 და R_2 , მაშინ ომის კანონის თანახმად:

$$I = \frac{U}{R},$$

სადაც R წრედის ამ უბნის სრული წინააღობაა.

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U}{R_2}. \quad (4)$$

I_1 -ის მნიშვნელობის I_2 -ზე გაყოფისას, მიიღება:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

გამტარების პარალელური შეერთებისას დენის ძალა თითოეულ გამტარში მათი წინააღობების უკუპროპორციულია.

მე-(4) ფორმულების მე-(3)-ში ჩასმით მიიღება:

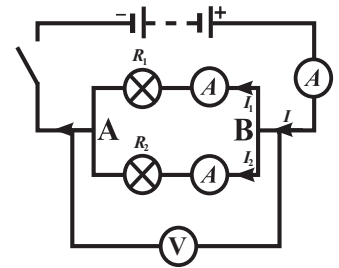
$$\frac{U}{R} = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2}, \quad \text{ანუ} \quad \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (5)$$

პარალელური შეერთებისას წრედის სრული წინააღობის შებრუნებული სიდიდე ტოლია თითოეული გამტარის წინააღობების შებრუნებული სიდიდეების ჯამისა.

მე-(5)-დან მიიღება: $R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$

თუ $R_1 = R_2 = \dots R_n = r$, მაშინ, $R = \frac{r}{n}$.

ამრიგად, გამტარების მიმდევრობითი შეერთებისას მთელი წრედის წინააღობა იზრდება, პარალელურად შეერთებისას კი მცირდება.



სურ. 77

91. დენის მუშაობა და სიმძლავრე

წრედებში ელექტრული დენის ენერგია სხვადასხვა სახის ენერგიად გარდაიქმნება. მაგალითად, ელექტროძრავაში ელექტრული დენის ენერგია გარდაიქმნება მექანიკურ ენერგიად, ელექტრონათურაში – შინაგან და გამოსხივების ენერგიად. ელექტროუთოში – შინაგან ენერგიად, ელექტროლიზისა და აკუმულატორების დამუშავებისას – ქიმიურ ენერგიად.

ელექტრული დენის მუშაობა გვიჩვენებს ენერგიის დანახარჯს წრედში დენის გავლისას.

ელექტრული დენის მუშაობა: $A = qU$. (1)

წრედში გამავალი ელექტრული მუხტი: $q = It$. (2)

(1) ფორმულაში მე-(2)-ს ჩასმით მიიღება: $A = IUt$.

წრედში ელექტრული დენის მუშაობა ტოლია დენის ძალის ნამრავლისა ძაბვაზე და დენის გავლის დროზე.

ომის კანონის თანახმად: $U = IR$ და $I = U/R$. ამის გათვალისწინებით ელექტრული დენის მუშაობა შესაძლებელია შემდეგი ფორმულებითაც გამოისახოს:

$$A = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t.$$

ერთეულთა SI სისტემაში ელექტრული დენის მუშაობა იზომება ჯოულებში.

1 ჯოული = 1 ვოლტი • ამპერი • წამი;

$$1 \text{ ჯ} = 1 \text{ ვ} \cdot \text{ა} \cdot \text{წმ}.$$

ელექტრული დენის მუშაობის სისტემგარეშე ერთეულად მიღებულია მუშაობა, რომელსაც ასრულებს ერთი ამპერი დენი ერთი საათის განმავლობაში, როდესაც წრედში ძაბვა ერთი ვოლტია. ამ ერთეულს უწოდეს ვატსაათი (1 ვტ. სთ).

$$1 \text{ ვტ.სთ} = 3600 \text{ ჯ} = 3,6 \text{ კჯ}.$$

პრაქტიკაში გამოიყენება ელექტრული დენის მუშაობის უფრო დიდი ერთეულები.

$$1 \text{ კვტ.სთ} = 1000 \text{ ვტ.სთ} = 3,6 \cdot 10^6 \text{ ჯ}.$$

$$1 \text{ მგვტ.სთ} = 1\,000\,000 \text{ ვტ.სთ} = 3,6 \cdot 10^9 \text{ ჯ}.$$

ელექტრული დენის მუშაობის გასაზომად საჭიროა ვოლტმეტრი, ამპერმეტრი და საათი. პრაქტიკაში დენის მუშაობას ზომავენ მრიცხველით.

სიმძლავრე დროის ერთეულში შესრულებული მუშაობის ტოლია. მექანიკაში სიმძლავრეს აღნიშნავენ N -ით, ელექტრობაში კი – P ასოთი.

$$P = \frac{A}{t}.$$

რადგან ელექტრული დენის მუშაობა $A = IUt$,

$$\text{ამიტომ,} \quad P = \frac{A}{t} = IU = I^2 R = \frac{U^2}{R}.$$

ელექტრული სიმძლავრის ერთეულია ერთი ვატი. ვატი არის ერთი ამპერი დენის სიმძლავრე, როცა წრედის უბანზე ძაბვა ერთი ვოლტის ტოლია.

$$1 \text{ ვტ} = 1 \text{ ა} \cdot \text{ვ}.$$

92. ჯოულ-ლენცის კანონი

თუ ელექტრული დენი გადის ისეთ წრედში, სადაც არ მიმდინარეობს ქიმიური რეაქციები და არ სრულდება მექანიკური მუშაობა, მაშინ ელექტრული დენის ენერგია გარდაიქმნება მხოლოდ გამტარის შინაგან ენერგიად და მისი ტემპერატურა იზრდება. ამის გამო ხურდება ელექტროღუმელი და ვარვარების ნათურის სპირალი, უთო და სხვა ელექტროხელსაწყოები.

ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად, თუ წრედში დენის გავლისას ელექტრული ენერგია მხოლოდ სითბურ ენერგიაში გადადის, მაშინ დენის მუშაობა $A = UIt$ ტოლი იქნება გამტარში გამოყოფილი სითბოს რაოდენობისა.

$$Q = A, \quad \text{ანუ} \quad Q = UIt = I^2 R t = \frac{U^2}{R} t$$

სითბოს რაოდენობა, რომელიც გამოიყოფა გამტარში დენის გავლის შედეგად, პირდაპირპროპორციულია დენის ძალის კვადრატისა, გამტარის წინააღობისა და დროისა, რომლის განმავლობაშიც მასში დენი გადის.

ამ დასკვნამდე ერთმანეთისაგან დამოუკიდებლად მივიდა ორი მეცნიერი: ინგლისელი ჯეიმს ჯოული და რუსი ემილ ლენცი. ამიტომ მას **ჯოულ-ლენცის კანონი** ეწოდა.

93. დენის წყაროს ელექტრომამოძრავებელი ძალა

გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობის ფარდობას იმ დადებით მუხტთან, რომელიც ამ ძალების გავლენით გადაადგილდება დენის წყაროს შიგნით უარყოფითი პოლუსიდან დადებითისაკენ, დენის წყაროს ელექტრომამოძრავებელ ძალას უწოდებენ (შემოკლებით ემძ).

ემძ-ს აღნიშნავენ $\mathcal{E}$ ასოთი.
$$\mathcal{E} = \frac{A_{\text{გარე}}}{q}. \quad (1)$$

სადაც გარე $A_{\text{გარე}}$ – გარე (არაელექტრული) ძალების მიერ q დადებითი მუხტის გადასადგილებლად შესრულებული მუშაობაა.

ისევე, როგორც ძაბვა, ემძ იზომება ვოლტებით. სხვადასხვა დენის წყაროს სხვადასხვა ემძ აქვს.

გარე ძალების მუშაობის შედეგად დაგროვილი ენერგია ხმარდება იმ ელექტრული ძალების მიერ შესრულებულ მუშაობას, რომელიც საჭიროა ჩაკეტილ წრედში დადებითი მუხტის გადაადგილებისათვის. გარე ძალების მუშაობა აკომპენსირებს ელექტრული ველის ენერგიის შემცირებას წრედში.

ამრიგად, ჩაკეტილ კონტურში დენის წყაროს ელექტრომამოძრავებელი ძალა არის გარე ძალების მიერ კონტურის გასწვრივ დადებითი მუხტის გადაადგილებისათვის შესრულებული მუშაობის შეფარდება ამ მუხტის სიდიდესთან.

(1) ფორმულის თანახმად, ემძ რიცხვითი მნიშვნელობა არის 1 კულონი დადებითი მუხტის გადაადგილებისათვის გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა. ის სკალარული სიდიდეა და შეიძლება იყოს როგორც დადებითი, ისე უარყოფითი. დენის წყაროს ახასიათებენ r წინააღობით, რომელსაც **შიდა წინააღობა**ს უწოდებენ.

94. ომის კანონი სრული წრედისათვის

სრული (შეკრული) წრედი, შედგება დენის წყაროს, რაიმე R წინააღობის, ჩამრთველისა და გამზომი ხელსაწყოებისაგან. სადენების, ჩამრთველისა და წრედში ჩართული რაიმე ელექტროხელსაწყოების წინააღობას გარე (R) წინააღობას უწოდებენ. ხოლო დენის წყაროს (r) წინააღობას კი – **შიდა წინააღობა**ს.

ენერგიის მუდმივობისა და ჯოულ-ლენცის კანონის გამოყენებით, თეორიულად დადგინდა დამოკიდებულება დენის წყაროს ემძ, დენსა და წრედის წინააღობას შორის.

მუხტის გადაადგილებისათვის გარე ძალების მიერ შესრულებული მუშაობა $A = \mathcal{E} \Delta q$. ვინაიდან $\Delta q = I \cdot \Delta t$, ამიტომ $A = \mathcal{E} I \Delta t$. გარე ძალების მუშაობის შედეგად წრედის შიდა და გარე უბანზე გამოიყოფა Q სითბოს რაოდენობა, $Q = Q_1 + Q_2$,

სადაც $Q_1 = IR \Delta t$; $Q_2 = Ir \Delta t$.

ენერგიის მუდმივობის კანონის თანახმად: $A = Q$, ანუ $\mathcal{E} I \Delta t = IR \Delta t + Ir \Delta t$.

აქედან, $\mathcal{E} = IR + Ir$, $I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$.

$R + r$ სიდიდეს უწოდებენ **წრედის სრულ წინააღობას**. ჩვეულებრივ $r \ll R$.

ამგვარად, **სრულ წრედში დენის ძალა ტოლია დენის წყაროს ემძ-ის შეფარდებისა წრედის სრულ წინააღობასთან**. მას უწოდებენ **ომის კანონს სრული წრედისათვის**.

თუ წრედში ჩართული დენის წყაროები მიმდევრობითაა შეერთებული, მაშინ დენის წყაროს ბატარეის ემძ ცალკეული დენის წყაროების ემძ-ების ჯამის ტოლია, ხოლო შიგა წინააღობა ყველა დენის წყაროს შიგა წინააღობების ჯამის ტოლი. ამიტომ ომის კანონი სრული წრედისათვის იქნება:

$$I = \frac{n \cdot \mathcal{E}}{R + nr}.$$

დენის წყაროების პარალელურად შეერთებისას ბატარეის ემძ იქნება იგივე, რაც ერთი დენის წყაროს ემძ, შიგა წინაღობა კი მოიკლებს n -ჯერ. ამიტომ, ომის კანონს ექნება შემდეგი სახე:

$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + \frac{r}{n}}$$

დენის წყაროების პარალელური შეერთებისას ჯამური ელექტროენერგია მატულობს. ძაბვა დენის წყაროს მომჭერებზე განთული წრედის დროს დაახლოებით ემძ-ს ტოლია. თუ წრედის გარე წინაღობა დასაშვებ მნიშვნელობაზე ნაკლებია ($R \rightarrow 0$), მაშინ წრედში დენი საგრძნობლად მოიმატებს. ამ მოვლენას **მოკლე ჩართვა** ეწოდება.

95. ელექტრული დენი მეტალებში და სითხეებში

მანდელშტამის და პაპალექსის, შემდგომში სტუარტისა და ტოლმენის ცდებით დადასტურდა, რომ **ელექტრული დენი მეტალებში თავისუფალი ელექტრონების მოწესრიგებული მოძრაობით არის განპირობებული**. თავისუფალი ელექტრონების მოძრაობის საშუალო სიჩქარე მეტალში არის 10^{-4} მ/წმ. ელექტრული იმპულსი კი სინათლის სიჩქარით ვრცელდება მასში.

სითხეებში ელექტრული დენი არის დადებითი და უარყოფითი იონების მიმართული მოძრაობა.

ასეთ გამტარობას **იონური გამტარობა** ეწოდება. თუმცა, სითხეს შეიძლება ჰქონდეს ელექტრონული გამტარობაც. მაგალითად, ასეთი გამტარობა ახსიათებს თხევად მეტალებს.

იონური გამტარობისას დენის გავლა დაკავშირებულია ნივთიერების გადატანასთან. ელექტროდებზე ხდება იმ ნივთიერების დალევა, რომელიც ელექტროლიტის ხსნარის შემადგენლობაში შედის.

ელექტროლიტში დენის გავლისას ელექტროდებზე ნივთიერების გამოყოფის პროცესს ელექტროლიზი ეწოდება.

● ფარადეის პირველი კანონი

ელექტრული დენის გავლისას ელექტროლიტში ელექტროდებზე გამოყოფილი ნივთიერების m მასა პროპორციულია ელექტროლიტში გავლილი მუხტისა:

$$m = kq.$$

სადაც პროპორციულობის k კოეფიციენტს **ნივთიერების ელექტროქიმიური ეკვივალენტი** ეწოდება.

ელექტროქიმიური ეკვივალენტი ტოლია ელექტროლიზის დროს ელექტროდებზე გამოყოფილი ნივთიერების მასის შეფარდებისა ელექტროლიტში გასული მუხტის რაოდენობასთან:

$$k = \frac{m}{q}.$$

k -ს ერთეულია 1 კგ/კ. სხვადასხვა ნივთიერებას სხვადასხვა ელექტროქიმიური ეკვივალენტი აქვს. ელექტროქიმიური ეკვივალენტი ასეც გამოისახება:

$$k = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n},$$

სადაც F – არის ფარადეის რიცხვი, A – ნივთიერების ატომური (მოლური) მასა,

n – ვალენტობა. ამიტომ:

$$m = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} It = \frac{1}{F} \cdot \frac{A}{n} q.$$

$\frac{A}{n}$ – არის ნივთიერების ქიმიური ეკვივალენტი, ფარადეის რიცხვი $F = 96500$ კ/მოლი.

96. ელექტრული დენი აირებში

ჩვეულებრივ პირობებში, ოთახის ტემპერატურაზე, აირი დენს არ ატარებს. მაგალითად, ჰაერი კარგი დიელექტრიკია, რადგან მასში პრაქტიკულად არ არის (ან ძალიან მცირე რაოდენობითაა) მუხტის თავისუფალი გადამტანები. გათბობით ან ულტრაიისფერი სხივების მოქმედებით აირის ნეიტრალური ატომების ნაწილი იონიზირდება, რადგან მოლეკულებისა და ატომების ენერგია იზრდება და მათში მყოფმა ელექტრონმა შეიძლება შეიძინოს ის მინიმალური ენერგია, რომელიც საჭიროა ატომისაგან მის ამოსაგლეჯად. ამ ენერგიას ეწოდება **იონიზაციის ენერგია**. იონიზაციის ენერგიის შეძენის შედეგად ელექტრონი თავისუფალი ხდება, ხოლო ელექტრულად ნეიტრალური ატომის ნაცვლად წარმოიქმნება დადებითი იონი. თუ თავისუფლად მოძრავი ელექტრონი დაეჯახა ნეიტრალურ ატომს, შეიძლება ამ უკანასკნელმა მიიერთოს ეს ელექტრონი და მაშინ მიიღება უარყოფითი იონი.

მაღალი ტემპერატურის დროს ელექტრონებისა და დადებითი იონების წარმოქმნის პროცესს **თერმული იონიზაცია** ეწოდება.

კონდენსატორის ფირფიტებს შორის არსებულ ჰაერში დენის გავლის პროცესს **არათავისთავადი აიროვანი განმუხტვა** ჰქვია.

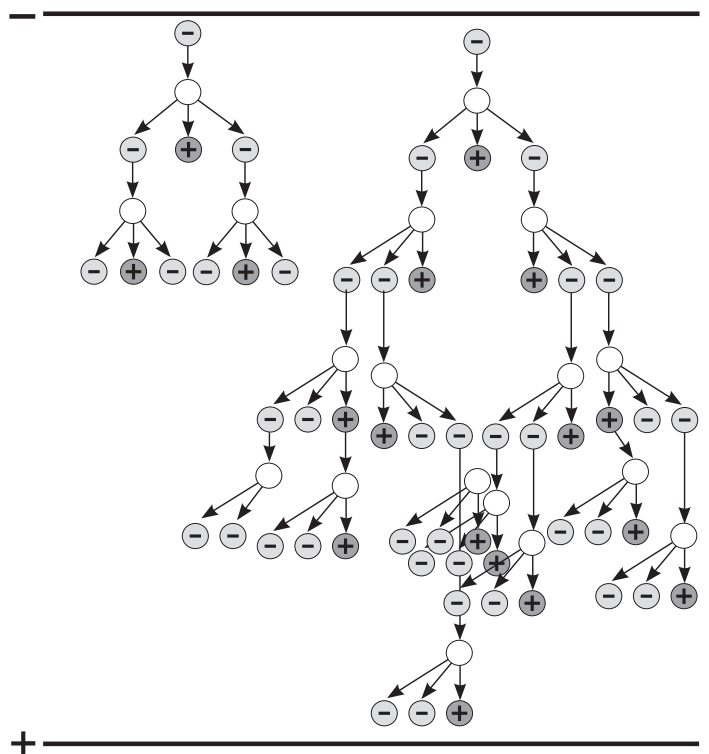
აირის გამტარობის მექანიზმი ელექტროლიტების ხსნარებისა და მეტალების ნაღნობის გამტარობის მექანიზმის მსგავსია. მასში შერწყმულია მეტალის ელექტრონული გამტარობა და ელექტროლიტების წყალხსნარებისა და ნაღნობების იონური გამტარობა. ე. ი. **აირში მუხტის გადამტანებია ელექტრონები, დადებითი და უარყოფითი იონები**.

ხშირად, ელექტრონისა და დადებითი იონის ურთიერთქმედებისას შეიძლება კვლავ წარმოიქმნას ნეიტრალური ატომი. ამ პროცესს დამუხტულ ნაწილაკთა **რეკომბინაციას** უწოდებენ.

როდესაც დამუხტულ ნაწილაკთა ახლად წარმოქმნილი წყვილების რიცხვი ტოლია რეკომბინაციის შედეგად გამქრალი წყვილების რიცხვისა, აირში მყარდება ე. წ. **დინამიური წონასწორობა**. ამ დროს დენის ძალის სიდიდე არ იცვლება. ეს პროცესი დამახასიათებელია არათავისთავადი განმუხტვისათვის. მაღალი ძაბვის ელექტრულ

ველში ნორმალური ატმოსფერული წნევის დროს აირის იონიზაციისას წარმოქმნილი დამუხტული ნაწილაკები აირის ატომებსა და მოლეკულებთან დაჯახების შედეგად ამოგლეჯენ მათგან ელექტრონებს. მეორადი ელექტრონები სხვა მოლეკულებთან და ატომებთან დაჯახებისას კვლავ იწვევს დამუხტული ნაწილაკების გაჩენას. ამრიგად, წარმოიქმნება დამუხტული ნაწილაკების ზეგავი. ამ მოვლენას **დარტყმითი იონიზაცია** ეწოდება (სურ. 78). განმუხტვას კი – თავისთავადი.

არსებობს თავისთავადი განმუხტვის სხვადასხვა სახე: მღვივარი განმუხტვა, ელექტრული რკალი, ნაპერწკლური და გვირგვინისებრი განმუხტვა.



სურ. 78

97. ელექტრული დენი ნახევარგამტარებში

ნახევარგამტარებს ელექტრული დენის გამტარობის მიხედვით შუალედური ადგილი უჭირავთ გამტარებსა და დიელექტრიკებს შორის. ნახევარგამტარული ნივთიერებები ხასიათდებიან განსაკუთრებული თვისებებით. კერძოდ, ამ ნივთიერებების კუთრი წინაღობა დამოკიდებულია ტემპერატურაზე და სინათლის მოქმედებაზე. თუ **ტემპერატურის მომატებით მეტალების კუთრი წინაღობა მატულობს**, მეტალებისაგან განსხვავებით **ნახევარგამტარების წინაღობა მცირდება**. მეტალზე სინათლის მოქმედება მათ გამტარობაზე არ მოქმედებს, ნახევარგამტარების გამტარობა კი სინათლის მოქმედებით იზრდება (ანუ წინაღობა მცირდება).

ნახევარგამტარში გვაქვს **ორი ტიპის მუხტის მატარებლები: ელექტრონები და ხვრელები**. ამიტომ ნახევარგამტარებს არა მხოლოდ **ელექტრონული**, არამედ **ხვრელური გამტარობაც** ახასიათებს. ასეთ გამტარობას **ნახევარგამტარის საკუთარი გამტარობა ეწოდება**.

მინარევული გამტარობა ეწოდება გამტარობას, რომელიც განპირობებულია **ნახევარგამტარში მინარევების შემცველობით**. მინარევები შეიძლება იყოს **დონორული (გამცემი)**, ანუ n ტიპის და **აქცეპტორული (მიმღები)**, ანუ p ტიპის.

$p-n$ – გადასვლა ანუ ელექტრონულ-ხვრელური გადასვლა არის სივრცული არე ორი ნახევარგამტარის n და p ტიპის კონტაქტისას, რომელშიც ხდება მუხტების მატარებლების გადასვლა ერთი ტიპის გამტარობის ნახევარგამტარიდან მეორეში.

ნახევარგამტარების $p-n$ – კონტაქტი გამოყენებულია დიოდებში. დიოდი არის ორელექტროდიანი ელექტრული ხელსაწყო, რომელსაც აქვს სხვადასხვა გამტარობა ელექტრული დენის მიმართულების მიხედვით.

98. ცვლადი დენი

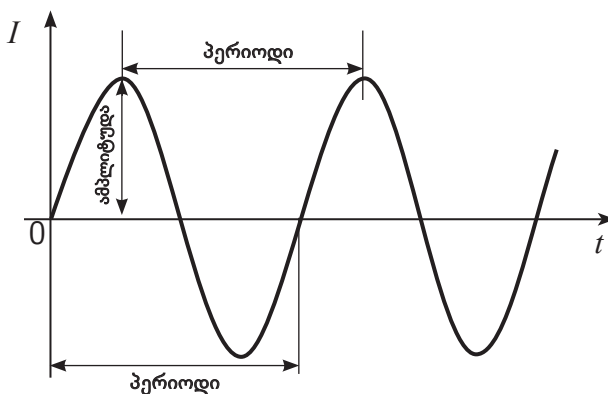
დენს, რომლის სიდიდე და მიმართულება პერიოდულად იცვლება სინუსის ან კოსინუსის კანონის მიხედვით ცვლადი დენი ეწოდება.

პრაქტიკული თვალსაზრისით ცვლად დენს მთელი რიგი უპირატესობა გააჩნია მუდმივ დენთან შედარებით. კერძოდ, ცვლადი დენის ამალღება ან დადაბლება გაცილებით უფრო ადვილია და ნაკლები ენერგეტიკული დანაკარგებით ხორციელდება, ვიდრე მუდმივი დენის გარდაქმნა. ცვლადი დენის ეს თვისება გამოიხატება მისი ტრანსფორმირების შესაძლებლობაში. ცვლადი დენი გამოიყენება მრეწველობაში და ყოფაცხოვრებაში.

79-ე სურათზე გამოსახულია ცვლადი დენის ძალის დროზე დამოკიდებულების გრაფიკი. დენი ერთი პერიოდის განმავლობაში 2-ჯერ იცვლის თავის მიმართულებას და 2-ჯერ აღწევს თავის მაქსიმალურ და მინიმალურ მნიშვნელობებს.

ე. ი. იგი ასრულებს ერთ სრულ რხევას. დროს, რომლის განმავლობაშიც დენი ასრულებს ერთ სრულ რხევას **ცვლადი დენის პერიოდი ეწოდება**.

1 ნმ-ში შესრულებულ რხევათა რიცხვს **ცვლადი დენის სიხშირე** ეწოდება. სამრეწველო დენის სიხშირე ჩვენს ქვეყანაში, ისევე, როგორც ევროპის ქვეყნებში 50 ჰერცია. აშშ-ში და იაპონიაში 60 ჰერცი.



სურ. 79

99. დენის ძალისა და ძაბვის ეფექტური მნიშვნელობა

ცვლადი დენის ძალა წრედში გამუდმებით იცვლება, როგორც სიდიდით, ასევე მიმართულებით. ამიტომ მას დროის სხვადასხვა მომენტში სხვადასხვა მყისიერი მნიშვნელობა გააჩნია. დენის ძალის საშუალო მნიშვნელობა 0-ის ტოლია. რადგანაც პერიოდის პირველ ნახევარში დენი ძალა დადებითია, მეორე ნახევარში უარყოფითი, ამიტომ საშუალო მნიშვნელობით მისი დაახასიათება შეუძლებელია. იმისათვის, რომ დაახასიათონ ცვლადი დენის ძალა წრედში, მას ადარებენ მუდმივ დენის ძალას, მის მიერ გამოყოფილი სითბოს რაოდენობის მიხედვით.

მუდმივი დენის იმ მნიშვნელობას, რომელიც გამტარში სითბოს იმავე რაოდენობას გამოყოფს, რამდენსაც ცვლადი დენი, **ცვლადი დენის ეფექტური (მოქმედი) მნიშვნელობა** ეწოდება.

ცვლადი დენის სიდიდე 10 ამპერის ტოლია ნიშნავს, ცვლადი დენის სითბური მოქმედება ისეთივეა, როგორიცაა 10 ა მუდმივი დენის სითბური მოქმედება. დავამყაროთ კავშირი წრედში გავლილ დენის ძალის მოქმედ მნიშვნელობასა და მის მაქსიმალურ მნიშვნელობას შორის. ვიპოვოთ ამ სიდიდის საშუალო მნიშვნელობა t დროის ისეთი შუალედისათვის, რომელიც გაცილებით დიდია ცვლადი დენის პერიოდთან შედარებით. რადგან კოსინუსი (ისევე, როგორც სინუსი) ნიშანცვლადი ფუნქციაა, ამიტომ მისი საშუალო მნიშვნელობა დიდი დროის შუალედში ნულის ტოლია.

რადგან $Q = PRt$, ხოლო $I = I_0 \sin \omega t$, ამიტომ დენის ძალის კვადრატი იქნება:

$$P = I_0^2 \sin^2 \omega t,$$

სადაც I_0 დენის მაქსიმალური (ამპლიტუდური) მნიშვნელობაა, $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi\nu$ – ციკლური სიხშირეა, ν – დენის სიხშირეა.

$$\sin^2 \omega t = \frac{1 - \cos 2\omega t}{2}, \quad \text{ამიტომ} \quad P = I_0^2 \frac{1 - \cos 2\omega t}{2} \quad (1)$$

რადგან $\cos 2\omega t$ ფუნქციის საშუალო მნიშვნელობა დროის დიდი შუალედისათვის არის ნული, (1) ფორმულიდან მიიღება:

$$P = \frac{I_0^2}{2}, \quad \text{აქედან,} \quad I = \frac{I_0}{\sqrt{2}}$$

I – დენის ეფექტური (მოქმედი) მნიშვნელობაა, I_0 – დენის ამპლიტუდური ანუ მაქსიმალური მნიშვნელობა.

ანალოგიურად მიიღება ძაბვისა და ემძ-ის მოქმედი მნიშვნელობები:

$$U = \frac{U_0}{\sqrt{2}}, \quad \mathcal{E} = \frac{\mathcal{E}_0}{\sqrt{2}}.$$

დენის ძალისა და ძაბვის მოქმედი მნიშვნელობების რეგისტრაციას ახდენს ცვლადი დენის ამპერმეტრი და ვოლტმეტრი.

100. ტრანსფორმატორი

მონყობილობას, რომელიც ძაბვის გარდასაქმნელად გამოიყენება გადაცემული სიმძლავრის შეუცვლელად, ტრანსფორმატორი ეწოდება (ტრანსფორმატორი, *Transformare* – გარდაქმნა).

ტრანსფორმატორი შედგება სატრანსფორმა-

ტორო ფოლადის ჩაკეტილი გულარისა და მასზე

ჩამოცმული ორი გრაგნილისგან, რომლებზეც დახვეულია სხვადასხვა განიკვეთის მქონე იზოლირებული გამტარები (სურ. 80).

ერთ გრაგნილზე დახვეულია გამტარების ხვიების მცირე რიცხვი n_1 , ხოლო მეორეზე ხვიების დიდი რიცხვი n_2 . გრაგნილს, რომლის ბოლოებზე მოდებულია გარდასაქმნელი ძაბვა, ეწოდება პირველადი გრაგნილი. ხოლო გრაგნილს, რომლის ბოლოებზე მიიღება გარდაქმნილი U_2 ძაბვა – მეორადი გრაგნილი.

თუ პირველად გრაგნილზე მოდებული ძაბვა ნაკლებია, ვიდრე მეორადზე, მაშინ ტრანსფორმატორს ამამალლებელი ეწოდება, წინააღმდეგ შემთხვევაში ტრანსფორმატორი დამადაბლებელია. ტრანსფორმატორის მოქმედების საფუძველია ელექტრომაგნიტური ინდუქციის მოვლენა. პირველად გრაგნილში გამავალი ცვლადი დენი ტრანსფორმატორის გულარში აღძრავს ცვლად მაგნიტურ ველს. რადგან გრაგნილები ჩამოცმულია საერთო გულარზე, ამიტომ მათ განჭოლავს ერთი და იგივე მაგნიტური ნაკადი და გრაგნილების თითოეულ ხვიაში აღძრავს ერთსა და იმავე ემდ-ს. თითოეულ გრაგნილში ემდ-ის მოქმედი მნიშვნელობა იქნება:

$$\mathcal{E}_1 = en_1 \quad \text{და} \quad \mathcal{E}_2 = en_2.$$

ტრანსფორმატორის ფუჭი სვლისას, პირველად გრაგნილზე მოდებული U_1 ძაბვისა და $\mathcal{E}_1$ ემდ-ის ჯამი ტოლია პირველად გრაგნილში ძაბვის ვარდნისა: $\mathcal{E}_1 + U_1 = I_1 R_1$; ვინაიდან გრაგნილის აქტიური წინაღობა R_1 მცირეა, ამიტომ ამ გრაგნილზე ძაბვის ვარდნა $I_1 R_1 \approx 0$ და $\mathcal{E}_1 \approx -U_1$. მეორადი გრაგნილი განრთულია $I_2 = 0$, ძაბვის ვარდნა $I_2 R_2 \approx 0$.

ტრანსფორმატორის მუშა სვლისას მეორადი გრაგნილის წრედი არ არის განრთული, წრედში გაივლის I_2 დენი. ამიტომ პირობა $U_2 = \mathcal{E}_2$ აღარ შესრულდება და დამოკიდებულება არ იქნება ისეთი მარტივი, როგორიც ფუჭი სვლის დროს.

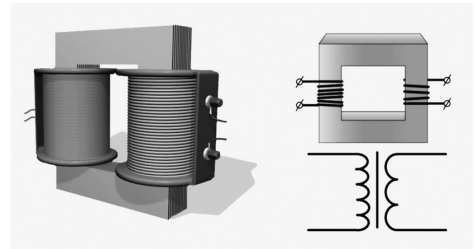
ტრანსფორმატორის პირველადი გრაგნილის ბოლოებზე ძაბვა ისე შეეფარდება მეორადი გრაგნილის ბოლოებზე ძაბვას, როგორც პირველადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვი მეორადი გრაგნილის ხვიათა რიცხვს. ამ შეფარდებას ტრანსფორმატორის ტრანსფორმაციის კოეფიციენტი ეწოდება და აღინიშნება k ასოთი:

$$k = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\mathcal{E}_1}{\mathcal{E}_2} = \frac{U_1}{U_2}.$$

იგი გვიჩვენებს, თუ რამდენჯერ ამაღლებს ან დაადაბლებს ტრანსფორმატორი ძაბვას. როცა მეორად გრაგნილთან მიერთებულია დატვირთვა, მაშინ მასში დენი გადის. მეორად გრაგნილში გამავალი დენი უკუგავლენას ახდენს პირველად გრაგნილში გამავალ დენზე. უნდა შევნიშნოთ, რომ სიმძლავრე ორივე გრაგნილში თითქმის ერთნაირია – გრაგნილებისა და გულარის გათბობისას დანაკარგები უმნიშვნელოა.

$$\text{თუ} \quad I_1 U_1 = I_2 U_2, \quad \text{აქედან,} \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}.$$

ე. ი. რამდენჯერაც იზრდება ძაბვა, იმდენჯერ მცირდება დენის ძალა. ამრიგად, ცვლადი დენის გადაცემა შორ მანძილზე ხელსაყრელია მაღალი ძაბვით. ამ მიზნით ელექტროსადგურებთან ამაღლლებელ ტრანსფორმატორებს იყენებენ, ძაბვას ზრდიან ასიათასეულ ვოლტამდე. მომხმარებელთან კი იყენებენ დამადაბლებელ ტრანსფორმატორებს, რათა ძაბვამ დაინიოს მოსახმარებლად უსაფრთხო მნიშვნელობამდე.



სურ. 80

გამოყენებული ლიტერატურა:

1. რ. ქანთარია, ლ. ჩიჩუა, გ. ანდრონიკაშვილი, მ. სეხნიაშვილი, მ. ჯალიაშვილი.
ბუნებისმეტყველება 7 – გამომც. „კლიო“, „მერიდიანი“ 2012 წ.
2. რ. ქანთარია, ლ. ჩიჩუა. **ფიზიკა 8** – გამომც. „კლიო“, „მერიდიანი“ 2012 წ.
3. რ. ქანთარია, ლ. ჩიჩუა. **ფიზიკა 9** – გამომც. „კლიო“, „მერიდიანი“ 2012 წ.
4. რ. ქანთარია, თ. ჩიჩუა, ლ. ჩიჩუა. **ფიზიკა 10** – გამომც. „კლიო“, „მერიდიანი“ 2012 წ.
5. რ. ქანთარია, თ. ჩიჩუა, ლ. ჩიჩუა. **ფიზიკა 11** – გამომც. „კლიო“, „მერიდიანი“ 2012 წ.

